



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO CON UN CONTROL DE POSICIÓN PUNTO A PUNTO

AUTOR:

CRISTIAN LEONARDO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2.017

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CARTESIANO CON UN
CONTROL DE POSICIÓN PUNTO A PUNTO

AUTOR:

CRISTIAN LEONARDO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

DIRECTOR:

Ing. FREDY ALEXANDER AGUIRRE GÓMEZ

MAGISTER EN CAD CAM CIM

CO-DIRECTOR:

Ing. EDILBERTO CARLOS VIVAS GONZÁLEZ

MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.

2.017

Dedicatoria:

Primeramente a Dios por permitirme llegar a donde estoy, por darme todas las herramientas necesarias para superar con éxito cada obstáculo presentado en esta etapa.

A mis padres a quienes nunca podre acabar de agradecer por ser la principal fuerza e impulso de mis sueños, gracias a cada uno de ellos por confiar en mí cada día y creer en mí, a mi mami hermosa por siempre estar dispuesta a acompañarme en cada larga y agotadora noche de estudio, noches en las que su agradable compañía y sus cafés eran como agua en el más caluroso de los desiertos, a mi papá por siempre anhelar lo mejor para mi vida, quien todos los días me preguntaba cómo iba y me animaba a seguir adelante y nunca parar, muchas gracias a los dos por cada una de sus palabras que me guiaron y me guiaran durante toda mi vida.

A mi hermano Cesar, quien fue ese apoyo fundamental en todo momento en la construcción y elaboración de esta tesis, gracias por preferir pasar largos y tediosos días a mi lado que ir a entrenar y hacer lo que más le gusta. Él que en todo momento aportó grandes y valiosas ideas, que jamás permitió que me rindiera en los momentos de frustración, y siempre apoyarme y acompañarme, por contar hasta el último momento con toda su ayuda y entusiasmo para finalizar este proyecto que me ayudó a iniciar.

A ella, quien siempre ha sido mi más grande inspiración y ejemplo en la vida, es y siempre será ese engrane perfecto para poder llegar y alcanzar las más grandes metas, como lo es esta dichosa y exitosa victoria, gracias a ella que en todo momento fue felicidad, apoyo y palabras de ánimo cuando las cosas se ponían difíciles; es esa persona a la cual amo mucho y por la cual estaré siempre dispuesto a enfrentar cualquier cosa en todo momento. Te doy infinitas gracias mi amor por tanta ayuda y aportes no solo para el desarrollo de mi tesis, sino también para mi vida, siempre serás mi más grande inspiración y motivación.

Agradecimientos:

A la Universidad Libre de Colombia y especialmente a la Facultad de Ingeniería Mecánica, agradezco todo el apoyo brindado en infraestructura y recursos.

Al Ingeniero Fredy Aguirre quien me brindó su apoyo y conocimiento como director para lograr la culminación de este proyecto.

Al Ingeniero Carlos Vivas, quien me guio y ayudo en parte fundamental para el desarrollo y finalización del proyecto.

A Alex Fuquene, compañero incondicional durante mis prácticas laborales, quien se convirtió en un amigo y le doy mil gracias por sus aportes y colaboración en la fabricación de varias de las piezas necesarias para el funcionamiento y culminación de este proyecto.

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza el diseño, modelamiento y construcción de un robot cartesiano con un control punto a punto básico para que en trabajos futuros mecanice espuma de poliuretano expandido.

Se realizan los cálculos estructurales y el modelo mediante SolidWorks para simular el comportamiento de este. El robot cuenta con tres grados de libertad y los ejes x, y y z son movidos por motores paso a paso Nema 17 acoplados a una varilla roscada de $\frac{1}{2}$ pulgada.

Se realizó un control punto a punto utilizando un Arduino mega 2560, drivers Pololu A4988 para darle movimiento a los motores y finales de carrera para establecer el cero de la máquina y los límites del robot. El control se realizó mediante software Arduino y la interfaz gráfica se hizo mediante Guide-Matlab.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	12
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	14
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
5. MARCO REFERENCIAL	15
5.1 MARCO TEÓRICO.....	15
5.1.1 Robótica Industrial.....	15
5.1.2 Clasificación del robot industrial	15
5.1.3 Configuración Cinemática de un Robot	16
5.1.5 Sistema CNC (control numérico computacional)	17
5.1.6 Proceso de Mecanizado por arranque de Viruta	18
5.2 MARCO CONCEPTUAL.....	19
5.3 ESTADO DEL ARTE	20
5.3.1 Introducción a un Robot Industrial.....	20
5.3.2 Generalidades Robot Cartesiano.	20
5.3.3 Diseño del Robot y sus Componentes.	21
5.4 MARCO LEGAL Y NORMATIVO.....	23
6. METODOLOGÍA.....	25
6.1 SELECCIÓN MATERIAL A MECANIZAR	26
6.2 SELECCIÓN PROPUESTA DE DISEÑO	27
6.2.1 Matriz QFD	27
6.2.2 Alternativas de Diseño.	30
6.2.3 Selección de la Alternativa de Diseño	32
6.3 REALIZACIÓN DEL MODELO DEL ROBOT EN SOLIDWORKS	33
6.3.1 Modelo del subconjunto Z	33
6.3.2 Modelo del subconjunto Y	34
6.3.3 Modelo del subconjunto X	34
6.4 CÁLCULOS DE LAS PARTES ESTRUCTURALES	36
6.4.1 Calculo de estructura del eje Y.....	36
6.4.2 Calculo de estructura del eje X.....	46
6.4.3 Calculo de los elementos verticales Columnas	54

6.4.4	Calculo del perfil de los carros.	57
6.5	SIMULACIÓN CÁLCULOS ESTRUCTURALES.....	61
6.5.1	Perfil eje Y	61
6.5.2	Perfil eje X.....	63
6.5.3	Perfil carro	64
6.5.4	Simulación Arco compuesto Eje Y y columnas	65
6.6	CÁLCULO DE ELEMENTOS DE POTENCIA	66
6.6.1	Calculo del posible motor para corte de material.	66
6.6.2	Cálculo de Tornillo de potencia	70
6.7	SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN ELEMENTOS DE SENSORES Y ACTUADORES.....	73
6.7.1	Selección del motor pasó a paso	73
6.7.2	Micro controlador.....	74
6.7.3	Sensor de finales de carrera	75
6.7.4	Driver de Potencia del motor	75
6.7.5	Fuente De Alimentación	76
6.7.6	Caracterización Movimiento	76
6.8	CIRCUITOS ELÉCTRICOS	77
6.8.1	Drivers	77
6.8.2	Finales de Carrera.....	78
6.9	CONSTRUCCIÓN ROBOT CARTESIANO	79
6.10	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL PUNTO A PUNTO..	83
7.	CONCLUSIONES.....	86
8.	TRABAJOS FUTUROS	87
9.	BIBLIOGRAFÍA	88
10.	ANEXOS	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades Mecánicas Espuma de Poliuretano.....	26
Tabla 2 Requerimientos del Cliente	28
Tabla 3 Matriz de Ponderación Requerimientos del Cliente	28
Tabla 4 Matriz de Comparación de Requerimientos	30
Tabla 5 Calificación Propuestas de Diseño	32
Tabla 6 Fricción de diferentes materiales con Acero	58
Tabla 7 Velocidad y Avance de la Herramienta	67
Tabla 8 Viruta Admisible	68
Tabla 9 Velocidades de Avance Robot Cartesiano.....	77
Tabla 10 Pines Digitales a los que van conectados los drivers de los Motores	78
Tabla 11 Pines digitales finales de carrera de Home e Interrupción	79

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Esfuerzo Normal.....	40
Ecuación 2 Inercia de un Rectangulo	41
Ecuación 3 Esfuerzo Cortante	42
Ecuación 4 Primer momento del Area	42
Ecuación 5 Esfuerzos Principales.....	42
Ecuación 6 Factor de Seguridad.....	43
Ecuación 7 Medida minima de longitud de Cara.....	56
Ecuación 8 Esbeltez de la Columna	57
Ecuación 9 Esbeltez minima para el punto T	57
Ecuación 10 Radio de Giro	57
Ecuación 11 Esfuerzo Normal con carga aplicada en plano Normal	60
Ecuación 12 Cortante por Carga Transversal perfil Cuadrado	60
Ecuación 13 Cortante por Carga Transversal perfil Circular.....	61
Ecuación 14 Cantidad de Viruta Admisible	66
Ecuación 15 Viruta Admisible en funcion de la Potencia y la Fresa.....	67
Ecuación 16 Velocidad de Corte.....	67
Ecuación 17 Potencia de Corte.....	68
Ecuación 18 Torque Requerido para mover la Carga.....	70
Ecuación 19 Esfuerzo Cortante debido a Tr	71

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Configuración y Robot Cartesiano	17
Ilustración 2 Diagrama de flujo procedimiento diseño y fabricación.....	25
Ilustración 3 Esfuerzo a él cizallamiento vs Densidad	27
Ilustración 4 Valores de Relación.....	29
Ilustración 5 Propuesta de Diseño 1	31
Ilustración 6 Propuesta de Diseño 2	31
Ilustración 7 Propuesta de Diseño 3	32
<i>Ilustración 8 Modelo subconjunto z</i>	33
Ilustración 9 Sub Conjunto Y.....	34
Ilustración 10 Sub Conjunto X.....	35
Ilustración 11 Robot Cartesiano.....	35
Ilustración 12 Carga de Z en mitad de la viga de Y	36
Ilustración 13 Propiedades físicas mecanismo Z.....	37
Ilustración 14 Diagrama de cuerpo libre mecanismo Z en medio de la viga Y.....	38
Ilustración 15 Diagrama de cortante y flexión mecanismo Z en medio de la viga Y	39
Ilustración 16 Geometría perfil 1 ½ pulgada x ¾ pulgada.....	40
Ilustración 17 Carga Z en el extremo máximo de la viga Y.....	42
Ilustración 18 Diagrama de cuerpo libre mecanismo Z en el extremo máximo de la viga Y	42
Ilustración 19 Diagrama de cortante y flexión mecanismo Z en el extremo máximo de la viga Y.....	43
Ilustración 20 Geometría perfil 3 pulgada x 1 pulgada.....	45
Ilustración 21 Carga total sobre la viga X	47
Ilustración 22 Propiedades físicas eje Y	47
Ilustración 23 Diagrama de cuerpo libre viga X	48
Ilustración 24 Diagrama de cortante y flexión viga X	50
Ilustración 25 Geometría perfil cuadrado de ½ pulgada	51
Ilustración 26 Geometría perfil cuadrado de 1 pulgada	51
Ilustración 27 Geometría perfil cuadrado de 2 pulgada	53
Ilustración 28 Dimensiones Elementos verticales	55
Ilustración 29 Curva de Euler.....	56
Ilustración 30 Conjunto Carro	57
Ilustración 31 Diagrama de fuerzas perfil carros.....	58
Ilustración 32 Vista lateral conjunto carro	60
Ilustración 33 Esfuerzo simulado perfil eje Y	62
Ilustración 34 Factor de seguridad simulado perfil eje Y.....	62
Ilustración 35 Esfuerzo simulado perfil eje X	63
Ilustración 36 Factor de seguridad simulado perfil eje X.....	63
Ilustración 37 Esfuerzo simulado perfil carro	64
Ilustración 38 Factor de seguridad simulado perfil carro.....	64
<i>Ilustración 39 Esfuerzo simulado Arco Fuente: Autor del proyecto, (2017)</i>	65
Ilustración 40 Factor de Seguridad Simulado Arco	65

Ilustración 41 Deflexión simulada Arco Fuente: Autor del proyecto, (2017).....	66
Ilustración 42 Tornillo de Potencia	71
Ilustración 43 Motor Nema 17	74
Ilustración 44 Arduino Mega 2560	74
Ilustración 45 Final de Carrera.....	75
Ilustración 46 Pololu A4988	76
Ilustración 47 Fuente alimentación ATX	76
Ilustración 48 Circuito eléctrico drivers A4988	78
Ilustración 49 Circuito eléctrico finales de carrera.....	78
Ilustración 50 Acople Motor-Tornillo.....	79
Ilustración 51 Carros a) Carro eje Y b) Carro eje X c) Carro eje Z.....	80
Ilustración 52 Eje Y	80
Ilustración 53 Conjunto eje Z	81
Ilustración 54 Final de Carrera.....	81
Ilustración 55 Robot cartesiano construido	82
Ilustración 56 Robot cartesiano construida	82
Ilustración 57 Interfaz Grafica	83
Ilustración 58 Diagrama rutina para establecer Home e interrupción	84
Ilustración 59 Diagrama Control punto a punto.....	85
Ilustración 60 Administrador de Dispositivos	102
Ilustración 61 Puertos (COM Y LPT)	103
Ilustración 62 Configuración del Puerto	103
Ilustración 63 GUI ROBOT CARTESIANO	104
Ilustración 64 Editor de Matlab.....	104
Ilustración 65 Interfaz Grafica	105
Ilustración 66 Botón Desconectar	106
Ilustración 67 Verificación Desconectar el Robot.....	106
Ilustración 68 Acople Flexible	107
Ilustración 69 Varillas Roscadas	107

LISTA DE ANEXOS

Anexo A Propiedades Aluminio 6063.....	91
Anexo B Datasheet Motor paso a paso Nema 17	92
Anexo C Datasheet Driver Pololu A4988	93
Anexo D Código Arduino Control Punto a Punto	98
Anexo E Manual de Usuario y Mantenimiento	101
Anexo D Planos	108

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las industrias buscan un incremento en la productividad a un menor costo de mano de obra y un aumento significativo en la calidad, es por esto que la automatización de procesos día a día se ha convertido en un tema de interés y necesidad.

Dentro de las aplicaciones de las maquinas automatizadas, se encuentra el robot cartesiano XYZ o también llamado robot cartesiano, máquina utilizada normalmente para tareas de soldadura, mecanizado y pintura. El robot cartesiano consiste en la combinación de movimientos lineales independientes que generan trayectorias complejas en un espacio tridimensional. Sin embargo, este tipo de máquinas son costosas comercialmente, su infraestructura es cerrada y no permite modificaciones para el desarrollo de prácticas con fines académicos e investigativos. Es por esto que en el presente proyecto se realiza el diseño y construcción de un robot cartesiano que permita estudiar los problemas de diseño, mecanizado y control; de modo que se pueda manipular materiales y herramientas de trabajo liviano, imitando lo que pasaría en un equipo industrial, además de ser un equipo de bajo costo.

En este trabajo se seleccionó la espuma de poliuretano expandido como material a mecanizar en un futuro ya que el alcance de este proyecto es realizar un control de posicionamiento de herramienta y no de mecanizado final, este material fue elegido ya que es útil para hacer prototipado rápido y no necesita mucha potencia de corte. Se realizó el diseño, modelo, cálculos estructurales y la simulación para luego construir la robot cartesiano. El control punto a punto tiene como objetivo posicionar la herramienta en los puntos donde se va a realizar la operación de mecanizado, lo importante de este tipo de control es que se alcance un punto en un mínimo tiempo y con precisión sin importar la coordinación entre los tres ejes. Este control se diseñó mediante los softwares de Arduino y Matlab. Se espera que en el futuro haya una continuación de este trabajo y se diseñe un control más robusto que permita mecanizar.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Un robot cartesiano es una configuración de tres articulaciones prismáticas, cuyas variables son las coordenadas cartesianas de la herramienta utilizada como efector con respecto a la base del mismo, es una configuración simple y sus aplicaciones principalmente se enfocan en campos de ensamble, almacenaje de productos y conformación de objetos mediante la aportación o eliminación de material. Algunos investigadores han propuesto métodos de configuración de los tres ejes, del mismo modo la forma en que estos se mueven por ejemplo se puede tener el eje Z quieto y que la mesa de trabajo se mueva en X o Y, la decisión de cómo establecer esta configuración depende netamente de las aplicaciones y requerimientos de funcionalidad de la máquina, adicionalmente se pueden implementar distintos tipos de elementos activos para el control y funcionamiento de cada eslabón del robot, como lo son los motores a paso y los sensores tipo encoders y de finales de carrera, se obtuvo como resultado que estos sensores son esenciales para evitar daños en el equipo producidos por dar órdenes mal especificadas al sistema de control.[10][16][27]

Los Robots Cartesianos son máquinas utilizadas en ingeniería para la fabricación de diversos elementos mediante el desprendimiento de material generado por una herramienta de corte o por el aporte de material en estado pastoso mediante capas para formar un elemento completo. El diseño de esta mesa requiere la implementación de algunas técnicas encontradas en la revisión del estado del arte, como también de todo el conocimiento adquirido de diseño y control automático en la Universidad.

Se implementará la metodología propuesta para la elaboración y construcción del Robot Cartesiano empezando con la consulta del estado del arte, realizando actividades propias del diseño como los cálculos, para así finalizar con la construcción del Robot, logrando su correcto funcionamiento e implementación en algún lugar de la Universidad donde los estudiantes puedan interactuar con el mismo.

3. JUSTIFICACIÓN

El propósito de diseñar e implementar un Robot Cartesiano es ponerlo a disposición de los estudiantes de la Universidad Libre para poder crear una electiva de prototipado rápido, en donde sería de gran importancia las aplicaciones del mismo y así poder complementar los conocimientos de cómo es un proceso de manufactura CNC vistos en la materia de Procesos de Conformado II, además de esto se deja a disposición de la comunidad académica, para realizar futuros trabajos de investigación de diferentes áreas de estudio de la universidad que contribuyan a el mejoramiento del Robot.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un Robot Cartesiano e implementación de un control de posición punto a punto.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Plantear opciones de diseño mecánico para el Robot Cartesiano y seleccionar la materia prima que se mecanizará.
- Desarrollar cálculos estructurales, de funcionamiento de la propuesta seleccionada y validar el comportamiento por medio de simulación.
- Seleccionar sensores, actuadores y diseñar los circuitos de acondicionamiento de señal necesarios para el robot.
- Construir y realizar pruebas de funcionamiento del robot cartesiano.
- Realizar un control punto a punto de la posición del robot.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 Robótica Industrial

Son considerados como los robots más útiles que se encuentran en la actualidad conocidos como robots industriales o manipuladores. Para lograr una definición clara y concisa de lo que significa es necesario entender cada una de las ideas que cada Asociación impone. Por ejemplo la definición más comúnmente aceptada es la de la Asociación de Industrias de Robótica (RIA, *Robotic Industry Asociación*) la cual lo define como: ***“Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas”*** , Junto a esta se incluye la definición establecida por la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR), la cual ve necesario definir primero que es un manipulador y en base a esta la del robot, definiendo entonces un manipulador como un mecanismo formado por una sucesión de elementos en serie, articulados entre si y destinados a la sujeción y traslado de objetos. Además puede ser manipulado directamente por un operador humano o mediante un control lógico computacional y un robot definido como un manipulador automático controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar elementos siguiendo una trayectoria fija o programable. Se compone de uno o varios brazos que terminan en una muñeca. Poseen en su unidad de control un banco de memoria y puede también ser perceptor del entorno en el que trabaja mediante el uso de elementos sensoriales, cumplen funciones de manera cíclica y se adaptan a otras sin cambios en su diseño físico ni de material.^[32]

5.1.2 Clasificación del robot industrial

Gracias al surgimiento del desarrollo de micro controladores y a la implementación de servos en lazos cerrados, que permiten conocer con exactitud la posición real de los componentes de un robot y en el establecimiento del error con la posición deseada, se dio origen a una serie de tipos de robots, uno de estos son los robots de repetición o aprendizajes los cuales mediante el uso de controladores manuales o dispositivos auxiliares, repiten una secuencia de movimientos previamente realizados, otro son conocidos como robots inteligentes que son controlados mediante el uso de microcontroladores, además son capaces de relacionar y tomar decisiones dependiendo del medio que los rodea mediante la utilización de sensores, además existen los robots controlados por computador cuando además de ser controlados por un microcontrolador se dispone de un lenguaje compuesto por instrucciones adaptadas para el tipo de robot, con las que se puede ejecutar un programa secuencial para la elaboración

de un proceso. A este tipo de programación se le llama textual y no depende para su creación del manipulador.^[33]

5.1.3 Configuración Cinemática de un Robot

En la práctica es necesario diseñar un robot o su configuración de las tres articulaciones dependiendo de una aplicación específica, por ejemplo soldadura, manipulación de elementos, mecanizados, etc. Dependiendo entonces de la aplicación a usar los robots se configuran dentro de cinco tipos. Para propósitos de esta Investigación se mencionarán los tipos de configuración y una breve descripción de los mismos, pero se profundiza la información de una forma que es la cartesiana, entonces:

- **Configuración cilíndrica (RPP):** Es un robot que presenta 3 grados de libertad, uno rotacional debido a su base que posibilita el giro y dos movimientos lineales por sus articulaciones prismáticas.^[23]
- **Configuración esférica (RRP):** Posee dos articulaciones con posibilidad de rotación y una prismática, esta configuración puede apuntar en varias direcciones, y extender su muñeca en sentido radial.^[23]
- **Configuración articulada (RRR):** Tiene la posibilidad de girar en todas sus articulaciones, para así lograr posicionarse en un volumen de trabajo esférico, este tipo de robot es muy parecido al brazo humano, ya que posee una base, un brazo, antebrazo y en la punta una muñeca cada una con la posibilidad de giro.^[23]
- **Configuración SCARA (RRP):** Es similar al robot configurado de forma cilíndrica, diferenciándolo porque la rotación se puede obtener mediante uno o dos eslabones, permite también lograr mayores distancias horizontales gracias a sus dos articulaciones rotacionales.^[23]

5.1.4 Configuración Cinemática Cartesiana de un Robot (PPP)

Es una configuración compuesta por tres articulaciones (3D o PP). La posición de cada una de las articulaciones es controlada mediante coordenadas cartesianas (x, y si es de dos ejes o x, y, z si es de tres). Gracias a que los movimientos pueden iniciarse o detenerse simultáneamente en sus tres ejes el movimiento de la herramienta es mucho más suave, de igual forma permite que el robot se mueva directamente a una referencia, en lugar de seguir trayectorias paralelas a cada eje, una de las ventajas de un robot cartesiano es que sus movimientos son totalmente lineales permitiendo así la implementación de controles más simples, de igual manera tienen un alto grado de rigidez mecánica,

precisión y repetibilidad, pueden llevar cargas pesadas a lo largo de su campo de trabajo. En cuanto a sus desventajas los robots cartesianos son generalmente limitados en sus movimientos a su espacio de trabajo. La aplicación para la que se va a utilizar robot cartesiano en este proyecto consiste en la instalación de una herramienta de corte en la muñeca del robot con el fin de lograr mecanizados didácticos en materiales de bajos esfuerzos cortantes. Basado en el control numérico computarizado y en el funcionamiento de las fresadoras CNC.^{[21] [35]}

Ilustración 1 Configuración y Robot Cartesiano



Fuente: [35]

5.1.5 Sistema CNC (control numérico computacional)

Es una herramienta tecnológica que sirve para gobernar el funcionamiento mediante una serie de códigos alfanuméricos, básicamente el funcionamiento de una máquina herramienta es guiar, mediante un sistema de coordenadas (x, y, z), con este método se consigue una mayor precisión y menor desgaste de material comparado con los métodos y herramientas artesanales conocidas. El CNC ha aportado mejor control en el diseño y fabricación de activos y pueden ser usadas en procesos sencillos como llevar una herramienta a una posición lineal, como también el fresado de una pieza en tres dimensiones que por métodos convencionales resultaría demasiado costoso y de suma dificultad su realización.^[15]

Los programas de control numérico pueden automatizar procesos en una máquina herramienta como los son:

- Movimientos en los ejes.
- Velocidades de posición, traslación y de mecanizado.

- Cambios manuales o automáticos.

Las grandes ventajas de la utilización de sistemas gobernados por CNC como por ejemplo:

- Precisión y calidad en los productos.
- Uniformidad en las geometrías de las piezas fabricadas.
- Seguridad en el proceso de producción.

Del mismo modo entre sus desventajas se encuentran:

- Se debe tener extremo cuidado en la programación del cambio de herramienta y en la secuencia de operaciones de la misma.
- Costos elevados de mantenimiento, por los sistemas electrónicos y mecánicos complejos.

5.1.6 Proceso de Mecanizado por arranque de Viruta

Los procesos de mecanizado por arranque de viruta son de muchas aplicaciones en la industria y en los sectores académicos. En estos procesos, el tamaño del material a mecanizar debe circunscribir la geometría final de la pieza, ya que el material innecesario es arrancado en forma de virutas, esta cantidad de material arrancado va desde un porcentaje muy pequeño hasta un 70-90 % del tamaño original. Este tipo de fabricación comparado con otros métodos para conseguir las geometrías esperadas contemplan algunas ventajas e inconvenientes, las ventajas de este tipo de procesos son las razones mismas por las que su uso es tan extendido, entre estas se encuentre:^[14]

- Se consigue alta precisión dimensional.
- Se pueden realizar distintas y variadas formas.
- No cambia la microestructura del material conservando así sus propiedades mecánicas.
- Son procesos fáciles de automatizar.

De igual manera también tiene desventajas respecto a otros procesos de fabricación, en especial los de deformación plástica y fundición:

- Genera desechos que en muchos casos no son reciclables.
- Requiere mayor energía para el proceso.
- Tiempos elevados de producción.
- El tamaño de la pieza está limitado al área de trabajo de la máquina.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

- **Manufactura:** La manufactura tecnológicamente hablando se dice que es la aplicación de técnicas que involucran procesos químicos o físicos que modifican la geometría, propiedades, o el aspecto de un determinado material para elaborar partes o productos terminados.^[14]
- **Automática:** Conjunto de métodos y procedimientos para la sustitución del operario en tareas físicas y mentales previamente programadas.^[29]
- **Automatización:** Aplicación de la automática al control de procesos industriales.^[29]
- **PLC:** Es un dispositivo basado en microcomputadoras que usa instrucciones almacenadas en una memoria programable para instrumentar en forma lógica, secuenciar, temporizador, contar y aplicar funciones de control aritmético mediante módulos de entrada/salida digital o analógica para controlar diversas máquinas y procesos.^[15]
- **Robot cartesiano:** Es una mesa que puede desplazarse en cualquier dirección que combina los ejes x, y, z. ^[15]
- **Motor a paso:** Es un motor de corriente continua, que realiza avances angulares constantes en ambos sentidos de rotación y esta es generada por señales externas. ^[28]
- **Sensor:** Es un dispositivo que a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida traducible que es función de la variables medida. Es la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos.^[28]
- **Interruptor final de carrera:** Es un elemento de mando que se acciona de manera automática por la acción de un objeto móvil que se desplaza.^[10]
- **Sensores de proximidad:** Es un dispositivo capaz de transformar una magnitud física en una magnitud eléctrica.^[10]
- **Esfuerzo directo:** Se presenta en los casos en los que la fuerza total aplicada se reparte de igual manera en todas las partes de la sección transversal del elemento que soporta la carga.^[24]
- **Resistencia de Materiales:** Es el cálculo del máximo esfuerzo directo sobre un material que puede soportar el mismo antes de presentarse una deformación permanente en el mismo, este esfuerzo se puede comparar con la tabla de materiales presentes en libros de mecánica de materiales.^[24]
- **Manipuladores:** Sistemas mecánicos elaborados bajo un sistema sencillo de control permitiendo establecer los movimientos de los elementos.^{[32][33]}

5.3 ESTADO DEL ARTE

5.3.1 Introducción a un Robot Industrial. Este proyecto de grado se basará en la implementación del concepto y funcionamiento de un robot industrial cartesiano para usos académicos en la Universidad Libre de Colombia, por lo que es importante especificar que es un robot industrial y algunas de sus características relevantes.

La robótica industrial durante la última década ha adquirido mucha importancia en las áreas de investigación y desarrollo tecnológico, lo cual la hace muy atractiva para los futuros estudiantes y profesionales, pero para implementarla con propiedad y precisión se necesita tener conceptos básicos teóricos sobre la robótica y sus partes, en 1999 (OLIER, Iván; AVILÉS, Oscar y HERNÁNDEZ, Juan) , realizaron un artículo titulado *“Una introducción a la robótica industrial”* en el cual se describe detalladamente que es y la importancia de la robótica industrial en el mundo, a la vez se resaltan los componentes y estructuras de un robot el cual debe tener un sistema mecánico con accionamiento, transmisión, estructura y sensores externos e internos y un sistema de control con controles y sistemas operativos los cuales van a comunicar la parte mecánica con la electrónica. Al finalizar el artículo se puede decir que los robots son totalmente dependientes de cada configuración por lo cual no se puede regular diferentes robots con la misma programación, la robótica ha tenido un incremento en las áreas de conocimiento para desarrollarlas a su perfección es necesario tener buenas bases teóricas y hacer mucho trabajo experimental, nunca se podrá dominar solo una cosa ya que si no se tiene conocimientos teóricos no se podrá poner nada en práctica y viceversa. [27]

5.3.2 Generalidades Robot Cartesiano. Cuando se quiere implementar la construcción de un robot cartesiano XYZ es de mucha importancia tener en cuenta algunos requerimientos de la misma, por eso en el 2013 en el trabajo titulado (RAMÍREZ, Juan; CORREA, Julio y FLÓREZ Santiago) *“Diseño de la plataforma mecánica de un robot cartesiano XYZ automatizada”* sugiere aspectos como tamaño, peso, herramienta de corte, velocidad de operación, robustez, funcionalidad, ergonomía y apariencia, finalizando entonces en la conclusión de que se debe desarrollar un robot cartesiano XYZ que sirva como plataforma para una máquina de corte, con el fin de realizar el corte o transporte a lo largo de una trayectoria ya programada y debe ser de gran importancia que el sistema cuente con un mecanismo que permita acoplar herramientas necesarias para cumplir a cabalidad sus funciones, esta debe desplazarse en el eje Z.[31]

En el diseño de un robot cartesiano no solo es necesario construir el diseño mecánico de esta , sino también hay que implementar un sistema eléctrico y de control para un funcionamiento óptimo, en 2012 (ARANGO, John y ZULUAGA,

Carlos) realizaron un proyecto llamado “*Diseño de los sistemas eléctrico y de control para una mesa cartesiana XYZ*”, para desarrollar el control los investigadores utilizaron la plataforma de programación Baldor, para la interfaz gráfica y el Puente entre el control y los servomotores utilizaron el software LabVIEW; seguido a esto realizaron el diseño eléctrico de la mesa para el cual tuvieron en cuenta las especificaciones de la RETIE y del reglamento electrónico colombiano. Al culminar el proyecto obtuvieron excelentes resultados ya que se logró una interacción usuario-máquina y así se pudo manipular la posición de la mesa con mucha precisión.^[5]

5.3.3 Diseño del Robot y sus Componentes. En el momento de diseñar un sistema robótico, es necesario obtener información acerca de la posición de las articulaciones para realimentar el control del mismo. Por esto en el 2014 se desarrolló un trabajo por (HERNÁNDEZ, Alejandro) titulado “*Control de Una Fresadora CNC de uso Didáctico*” en donde sugieren alguno de los sensores más comunes utilizados para tal propósito, entre estos están los sensores de posición angular, los cuales miden la posición de cada articulación dependiendo del ángulo de rotación. Para este control se emplean fundamentalmente los encoders y resolvers, del mismo modo existen sensores con la capacidad de detectar la presencia de objetos dentro de un rango o radio definido utilizados comúnmente para detectar en las articulaciones los límites de carrera, estos pueden ser elementos de accionamiento mecánico o por contacto cerrando un circuito eléctrico generando una señal, también se puede detectar objetos sin contacto mediante la implementación de sensores inductivos o los basados en el efecto Hall. De igual manera se pueden detectar los objetos a través de sensores ópticos los cuales mediante un rayo de luz puede ser capaz de notar interferencias, generando algún tipo de señal. Se concluyó entonces que la selección de cualquier tipo de sensor depende estrictamente de las condiciones físicas del prototipo a utilizar y de las características de desempeño que se desea alcanzar durante el transcurso de las tareas operacionales de la máquina.^[15]

Desarrollar una fresadora de tres ejes conlleva a una inversión económica muy significativa, ya que sus partes no son comunes y fáciles de conseguir, pero muchas veces no se tienen los recursos necesarios para hacerla con la última tecnología o los últimos materiales del mercado, es por esto que en el 2008 (CAZAR, Marco) realizó una tesis llamada “*Diseño y construcción de una fresadora de 3 ejes y su software de control para el mecanizado de figuras geométricas formadas por líneas rectas en superficies de madera*” con la cual busco construir y diseñar dicha fresadora pero con materiales al alcance de cualquier persona, durante la investigación se realizó la parte morfológica de la máquina como un robot cartesiano, se utilizó un motor de corriente alterna el cual hizo las veces de taladro, y así mismo estos motores fueron gobernados por microcontroladores PIC18F452 y desarrollaron el software en un lenguaje C+, al terminar la tesis se pudo concluir que el mejor material para construir una robot cartesiano es el aluminio, para poder hacer desplazamientos milimétricos en la

mesa se necesita tener un tornillo sin fin de rosca muy fina y la mejor opción para el desplazamiento a lo largo de los ejes son rodamientos de cajón.^[8]

Para el desarrollo del proyecto es necesario definir o elegir un modelo para la mesa, para esto se puede optar por guiarse en el documento escrito en el 2010 (GALARZA, Juan y DAVILA, Miguel) titulado *“Diseño y Construcción de un taladro XYZ controlado por microcontrolador con interfaz gráfica mediante LabVIEW para la fabricación de circuitos compuestos”*, mencionan entonces que para el diseño de la mesa existen dos modelos básicos para una fresadora de prototipos, los cuales se diferencian en el tipo de movimiento cartesiano que realizan lo cual depende fuertemente del área de trabajo, tamaño y peso de las estructuras de apoyo de la unidad fresadora, las dos clases de configuraciones son Fresadora Basada en el movimiento del área de trabajo donde los ejes X y Y son los que se trasladan y realizan el desbaste del material, la otra es Fresadora basada en el movimiento de los ejes donde estos movimientos son realizados por los ejes Y y Z, es decir, la herramienta de corte es la que se traslada a lo largo de la placa de trabajo. Observando ambos modelos se concluye que la elección del tipo de configuración depende en gran medida de las disposiciones físicas y requerimientos técnicos requeridos al momento de realizar una tarea de fresado es decir, si se necesita un área de trabajo grande se escogería la segunda configuración, pero si no es tan necesario se podría escoger el primer tipo.^[12]

Cuando se habla de robótica es muy importante seguir indicaciones y tener claro todo lo que se quiere realizar por esto se debe hacer un diseño previo, simularlo y así comprobar si lo planteado teóricamente tiene lógica y es posible que sea llevado a la construcción en la vida real, en 2009 (CARVAJAL, Jaime; GODOY, Rubén y RODRIGUEZ, Willy) simularon e hicieron un proyecto llamado *“Proyecto mecatrónico de brazo robot cartesiano integrado a una celda de almacenamiento y recuperación automatizada AS / RS de un Sistema Flexible de Manufactura FMS”* en el cual diseñaron el robot basados en tres tareas fundamentales que son el modelamiento, la simulación e integración. En el modelamiento se hizo un reconocimiento de las necesidades, seguidamente se establecieron las funciones para las que el prototipo va a ser utilizado, se hizo el respectivo modelo matemático y el modelo computacional, después se seleccionaron los materiales y los elementos con los cuales se diseñaría al robot, se aplicó el modelo matemático en donde se obtuvieron las funciones de transferencia las cuales se simulan con controles básicos y por último se optimiza el diseño principal. En la parte de simulación se realizó una de forma gráfica, es decir de forma animada y la otra en tiempo real de donde se obtuvo una nueva función la cual permitió optimizar aún más el funcionamiento, finalmente en la integración en lo cual primero se hizo el ensamble del sistema mecatrónico y seguidamente la última optimización y se probó el prototipo final, al concluir el proyecto y seguir al pie de la letra cada uno de los pasos anteriores obtuvieron resultados satisfactorios a la hora de diseñar todo el brazo ya que se realizó de una manera ordenada y clara.^[7]

En la industria día a día se busca tener procesos de manufactura automatizados, aunque no solamente en la industria sino en las diferentes entidades educativas se necesitan tener estos elementos para manipularlos y entender su funcionamiento, es por eso que en el 2010 (MENA, Alex) realizó un diseño titulado *“Propuesta de diseño de un manipulador cartesiano”* en el cual describe como debería ser dicho manipulador, el investigador propone accionar este por medio de motores paso a paso para los ejes x , y. De igual forma un motoreductor para el eje Z, las piezas se propone realizarlas en aluminio de alta densidad con un sistema de control de lazo abierto y sensores de proximidad para que los ejes no vayan a chocar, con este proyecto se pretendió que el diseño respondiera a las demandas de la industria sin tener que ser una maquina muy costosa y en donde se pudieran hacer tareas poco complejas y servirían como una buena aplicación en las aulas.^[23]

La tecnología avanza de una manera muy veloz por esto siempre se ha buscado mejorar las condiciones de los aparatos tecnológicos que se tienen actualizándolos e incorporándoles las tecnologías más recientes para enriquecer continuamente su funcionamiento, por lo cual en el 2013 (MAURO, Andrés y ANIGSTEN, Mauricio) quisieron proponer un plan para modificar las condiciones de un robot industrial de 6 ejes para que este mejorara su funcionamiento, el título del proyecto es *“Sobre el sistema de control de un robot cartesiano”*, el cual consistió en proponer un cambio de la PC por un Single Board Computer (SBC) la cual ejecutará los procesos de control y generación de trayectoria, también se planeó la sustitución los bloques del hardware que estaban distribuidos entre dos placas de adquisición por un microcontrolador que tenía alto nivel de integración entre todos los componentes, con ese nuevo diseño los investigadores pretenden aumentar las posibilidades de comunicación del robot cartesiano con otros dispositivos, sistemas y sensores, a la vez el nuevo diseño disminuirá el consumo de energía y los costos ya que se tendrán menos partes independientes e integradas.^[22]

5.4 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

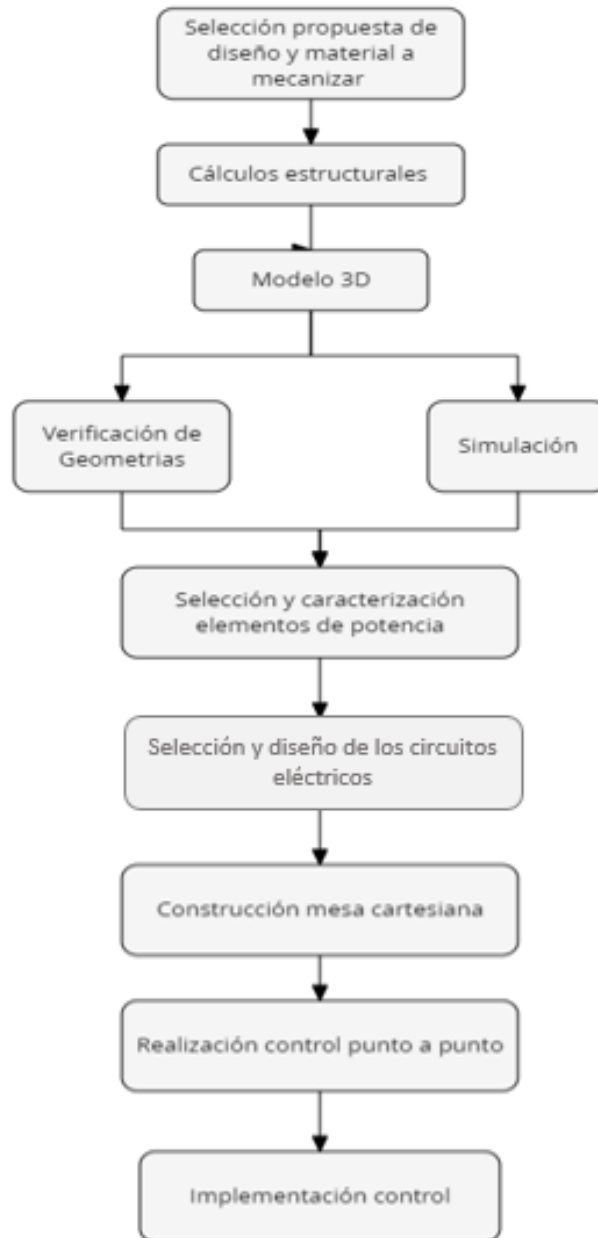
- **AEN/CTN 116 - Sistemas Industriales Automatizados:** Norma que abarca la automatización industrial e integración relacionada con la fabricación de componentes de múltiples tecnologías, se aplica al presente trabajo en cuanto a los ensayos realizados a el robot, a los parámetros de calidad y otros fundamentos.^[2]
- **ANSI RIA R15.06: Robot and Robot System Safety:** Incluye apartados sobre la definición de riesgos y de probabilidades de la ocurrencia de un accidente y el grado de severidad de un posible daño físico a una persona, se aplica en el proyecto en temas pertinentes con los requisitos para el diseño inherente de seguridad y medidas de protección para el uso del robot.^[4]

- **CEN 310 – Advanced Automation Technologies and Their Applications:** Normaliza los campos que se refieren a los sistemas de automatización y su aplicación e integración para asegurar estándares requeridos para el diseño, aprovisionamiento, fabricación y entrega de productos y servicios, también la automatización y control de equipos industriales, aplica en cuanto a el área del control del equipo y la especificación de los aspectos del software y el personal humano que van a gobernar el uso del robot.^[9]
- **ISO 10218:1992: Manipulating Industrial Robots – Safety:** Contiene los análisis de seguridad, definición de riesgos e identificación de posibles fuentes de peligros o accidentes. De igual manera contiene secciones sobre el diseño y fabricación de sistemas robotizados, teniendo en cuenta aspectos mecánicos, ergonómicos y de control, se aplicara a este proyecto para determinar planes de seguridad para prevenir accidentes producidos por una mala manipulación de los sistemas y componentes del robot.^[18]
- **ISO 9283: 1998 Manipulating Robots - Performance Criteria and Related Test Methods:** Define las principales características de funcionamiento, describe cómo deben especificarse y recomienda como se deben realizar los test. También se recogen ejemplos prácticos de cómo deben realizarse los informes de resultados, permite aplicar en este proyecto las características que describe la norma para realizar pruebas de rendimiento de los sistemas del robot como los son la precisión y repetibilidad, tiempo de estabilización de la posición, precisión de la trayectoria, entre otras.^[19]
- **NTC 1486 Documentación. Presentación De Tesis, Trabajos De Grado Y Otros Trabajos De Investigación:** Establece los parámetros para la redacción y presentación para el presente trabajo, aplicable para la presentación de los trabajos escritos pertinentes con la elaboración de informes y resultados propios del ejercicio del proyecto.^[25]
- **NTC 5613 Referencias Bibliográficas Contenido Forma Y Estructura:** Establece los parámetros indicados y forma de referenciar trabajos de grado, artículos investigativos, libros entre otros, utilizados para el desarrollo de los documentos escritos del proyecto.^[26]

6. METODOLOGÍA

El diagrama de la Ilustración 2 describe la secuencia de pasos realizados para el diseño y fabricación de la robot cartesiano del presente trabajo de grado.

Ilustración 2 Diagrama de flujo procedimiento diseño y fabricación



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

6.1 SELECCIÓN MATERIAL A MECANIZAR

El objetivo final del robot cartesiano va a ser permitir la realización de piezas o modelos mediante un método conocido como prototipado rápido por mecanizado, que consiste en la remoción de material de un bloque por medio de una herramienta giratoria perpendicular a la mesa de trabajo donde se encuentra el material. Esta herramienta es guiada por un computador para moverse a través del material, eliminando porciones del mismo hasta la forma final.

Los materiales que se pueden utilizar para el proceso son la mayoría de metales como: aluminio, cobre, plata, etc. Del mismo modo los plásticos duros son más útiles a la hora de hacer prototipos entre estos encontramos: Nylon, Acetal, Policarbonato, Acrílico, Espumas de poliuretano, poliestireno expandido entre otras.

Se decide entonces diseñar el robot para ser capaz de mecanizar sobre bloques de espuma de poliuretano, ya que es un material ligero de fácil manejo, barato, de igual forma como esta espuma es fácil de fabricación se pueden obtener bloques de prácticamente cualquier medida, para luego mecanizar y obtener el resultado en la geometría deseada.

La espuma rígida de poliuretano es un material sintético, habitualmente es utilizada para el aislamiento térmico, así pues sus densidades comunes son entre 30 y 100 Kg / m³ [1]

En la Tabla 1 se presentan las propiedades mecánicas de la Espuma de Poliuretano

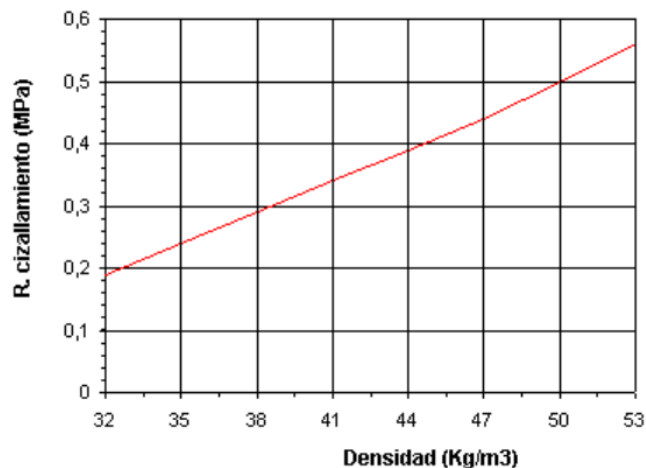
Tabla 1 Propiedades Mecánicas Espuma de Poliuretano

Propiedades Mecánicas	Valor Típico Unidad
Resistencia a la Tracción	3 y 10 Kp/cm ²
Resistencia a la compresión	1,5 y 9 Kp/cm ²
Resistencia al cizallamiento	1 y 5 Kp/cm ²
Módulo de elasticidad	40 y 200 Kp/cm ²

Fuente: [38]

Adicionalmente la Ilustración 3 es una gráfica que relaciona la Resistencia al cizallamiento con la densidad, propiedad de gran utilidad para el cálculo de las fuerzas necesarias para mecanizar este material.

Ilustración 3 Esfuerzo a él cizallamiento vs Densidad



Fuente: [37]

6.2 SELECCIÓN PROPUESTA DE DISEÑO

La selección de la propuesta de diseño será realizada mediante la implementación de la técnica del QFD, la cual mediante la fundamentación de los requerimientos del cliente junto con parámetros de diseño, constituyen un apoyo en la toma de decisiones de la etapa de diseño, logrando llegar a obtener un producto que involucre la calidad y satisfacción del cliente.

Para este proyecto las especificaciones y requerimientos de funcionamiento planteadas por el cliente se consideraron así:

Consisten en la construcción de una máquina que sea capaz de seguir una trayectoria punto a punto a lo largo de 3 ejes cartesianos, de esta forma lograr que llegue a realizar mecanizados en bloques de Espuma de Poliuretano permitiendo a los usuarios obtener piezas diseñadas con una utilidad específica, permitiéndoles usar una máquina práctica, económica y liviana, a continuación se mencionan en detalle las especificaciones expresadas por el cliente.

6.2.1 Matriz QFD

▪ Requerimientos del Cliente (Tabla 2).

- 1. Bajo Consumo de energía:** Se espera que el diseño de la máquina y sus componentes mecánicos no requieran de elevados recursos energéticos, esto se ve reflejado en elegir adecuadamente los motores y sensores que serían los elementos que consumen dicha energía.
- 2. Precisión de los movimientos:** Hace referencia a tres aspectos importantes en un robot, la resolución espacial que consiste en el incremento que posee un robot para ir de un punto 1 a un punto 2, también se encuentra la exactitud que se refiere a la capacidad del robot para situar su elemento efector en un punto señalado, y por último se tiene la repetibilidad que es la capacidad del robot de regresar al punto programado las veces que sean necesarias.
- 3. Cumpla con la velocidad de avance:** Se refiere a que la selección del motor sea la adecuada para llegar a la velocidad de avance para mecanizar el material sin que este se agriete o dañe.

4. **Económica:** Se busca que en la fabricación del robot los materiales utilizados y los elementos utilizados sean lo más económicos posibles.
5. **Robusto:** Se quiere lograr que el robot sea estructuralmente resistente para lograr la tarea para la que se diseña.
6. **Material de Construcción:** Este debe ser lo más versátil es decir que la unión entre eslabones no implique procesos de conformado complejos, también se busca que estos materiales sean los más ligeros posibles para evitar un pesos total excesivo en el robot.

En la Tabla 3 se confrontan los requerimientos del cliente en una matriz cuadrada, en donde se ubican horizontal y verticalmente los requerimientos y se establece una relación entre cada uno de ellos, ubicando un valor de 1 si existe una relación y 0 si no, al final se suma y se porcentualiza para así obtener la relevancia de cada uno de los requerimientos.

Tabla 2 Requerimientos del Cliente

Requerimientos del cliente		%	Calif cliente
1	Bajo consumo de energía	10,53%	90,00%
2	Precisión	26,32%	85,00%
3	Cumpla con la velocidad de avance	10,53%	85,00%
4	Económica	21,05%	90,00%
5	Robusto	10,53%	80,00%
6	Material de Construcción	21,05%	85,00%

Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Tabla 3 Matriz de Ponderación Requerimientos del Cliente

Matriz Ponderación de requerimientos cliente									
	1	2	3	4	5	6	total	pond	porcentaje
1	-	0	1	1	0	0	2	0,105	10,53%
2	1	-	1	1	1	1	5	0,263	26,32%
3	1	1	-	0	0	0	2	0,105	10,53%
4	1	1	0	-	1	1	4	0,211	21,05%
5	0	0	0	1	-	1	2	0,105	10,53%
6	1	0	1	1	1	-	4	0,211	21,05%
TOTAL							19	1	100,00%

Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Como se observa en la Tabla 2 y 3 el requerimiento 2 es el primordial con un porcentaje de 26,32%, lo que refleja que lo más importante para el cliente es que el robot cumpla con las 3 características antes mencionadas para la precisión del robot.

Una vez definido la ponderación de los requerimientos del cliente, se definen las características técnicas o requerimientos de diseño.

▪ **Requerimientos de Diseño**

Estos requerimientos abarcan toda la parte conceptual que aporta el equipo de diseño para garantizar en gran medida que el resultado final sea de calidad y

satisfactorio para el cliente, sin embargo también debe tener en cuenta parámetros con sentido para los técnicos que elaboran el proyecto. En este proyecto el papel de Diseñador también es desarrollado por el autor y el director del mismo, entonces:

- a) **Material de la estructura:** Debe garantizar cumplir los requerimientos de esfuerzos generados por el robot, sin embargo debe ser lo más livianos posible para cumplir con el requisito del peso.
- b) **Fuente de poder:** Se espera que la máquina cuente con una fuente de energía que permita cumplir a cabalidad sus operaciones.
- c) **Dimensión:** Se construirá el robot garantizando un área de trabajo aproximada de un metro cuadrado, para garantizar versatilidad en los trabajos a realizar.
- d) **Unión entre los elementos estructurales:** Se espera que la unión entre los perfiles sea la más sencilla garantizando condiciones de desempeño y de cargas.
- e) **Perfiles Estructurales:** Encontrar en el mercado la mejor opción para la estructura del robot.
- f) **Ajuste preciso de los eslabones:** Reducir el juego entre las piezas de corte ya que el mecanizado debe ser lo más exacto posible.
- g) **Sensores ideales:** Escoger de manera ideal los sensores que permitirán saber la ubicación de los eslabones del robot, de igual forma los necesarios para evitar daños al mismo.

▪ **Matriz de Relación**

A continuación se presenta la relación que existe entre los requerimientos del cliente con los de diseño, se determina mediante la intersección de las dos matrices de relaciones el cual determina, que tan bien los requerimientos de diseño dan respuesta a las necesidades del cliente.

Para esto se asignan valores dependiendo el grado de correlación entre cada una de las especificaciones, es decir se asigna un valor de 9 cuando existe una relación muy fuerte, 3 si existe una relación y 1 si no existe ninguna relación (Ilustración 4).

Ilustración 4 Valores de Relación

Relaciones	<ul style="list-style-type: none"> 9 Altamente relacionado 3 Relacionado 1 Baja relación
------------	---

Fuente: Autor del proyecto, (2017)

De la Tabla 4 se puede analizar las especificaciones del cliente comparadas con las de diseño, dando a conocer el enfoque en que se debe guiar el diseño de las alternativas que se ofrecen, para así elegir la que mejor se acomode y cumpla a los requerimientos hechos por el cliente.

Tabla 4 Matriz de Comparación de Requerimientos

Matriz Comparacion Requerimientos							
RC \ RD	a	b	c	d	e	f	g
1	1 0,105	9 0,947	3 0,316	1 0,105	1 0,105	1 0,105	1 0,105
2	1 0,263	9 2,368	3 0,789	1 0,263	1 0,263	1 0,263	9 2,368
3	3 0,316	3 0,316	9 0,947	1 0,105	1 0,105	9 0,947	9 0,947
4	9 1,895	1 0,211	3 0,632	3 0,632	9 1,895	1 0,211	1 0,211
5	3 0,316	1 0,105	3 0,316	9 0,947	9 0,947	3 0,316	1 0,105
6	9 1,895	1 0,211	3 0,632	9 1,895	9 1,895	3 0,632	1 0,211
TOTAL	4,79	4,16	3,63	3,95	5,21	2,47	3,95

Fuente: Autor del proyecto, (2017)

De la Tabla 4 es evidente que el requerimiento que obtuvo mayor puntaje y por consiguiente es de los más importantes en el diseño es el de los perfiles estructurales, quiere decir entonces que el diseño debe enfocarse en la obtención de unos perfiles que cumplan a cabalidad las funciones especificadas, este dato es de gran importancia a la hora de escoger la opción más recomendable del diseño.

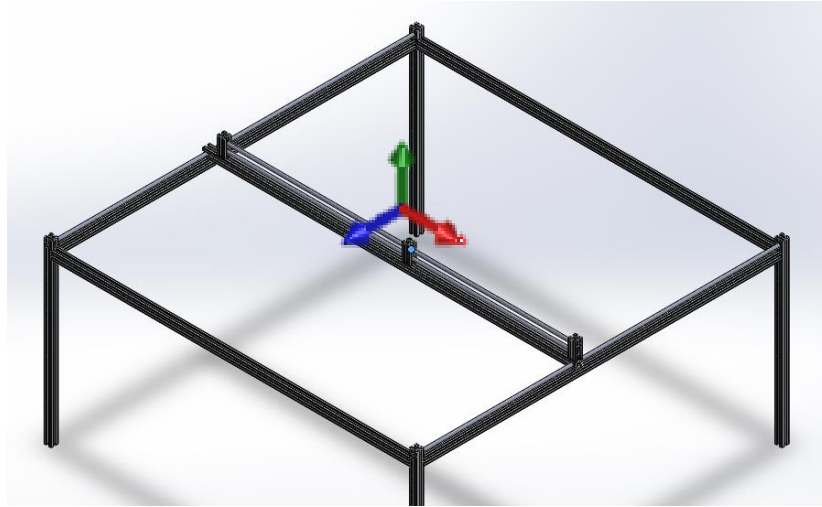
6.2.2 Alternativas de Diseño.

La idea de generar distintos tipos de diseño, es poder comparar sus funciones y morfología de tal forma que se pueda tener un punto de comparación y elegir la que cumpla de mejor manera las especificaciones dadas por el cliente desde un principio, para este proyecto se presentan tres distintas alternativas de diseño, donde cada uno cumple la misma función final pero de distinta manera. Se espera entonces confrontar las 3 y elegir la que mejor se acomode a las expectativas del cliente.

❖ Diseño 1

La primera alternativa que se plantea (Ilustración 5), es una configuración con apoyo en cada uno de los extremos de los eslabones del robot, su diseño se basa en una estructura rectangular construida mediante perfiles de aluminio sobre los cuales deslizan los ejes X, Y, Z. La principal característica de este diseño es que por su forma de construcción y a que la herramienta se mueve en los 3 ejes su área de trabajo puede alcanzar valores grandes. De igual forma es una opción de bajo peso y de relativa fácil construcción.

Ilustración 5 Propuesta de Diseño 1

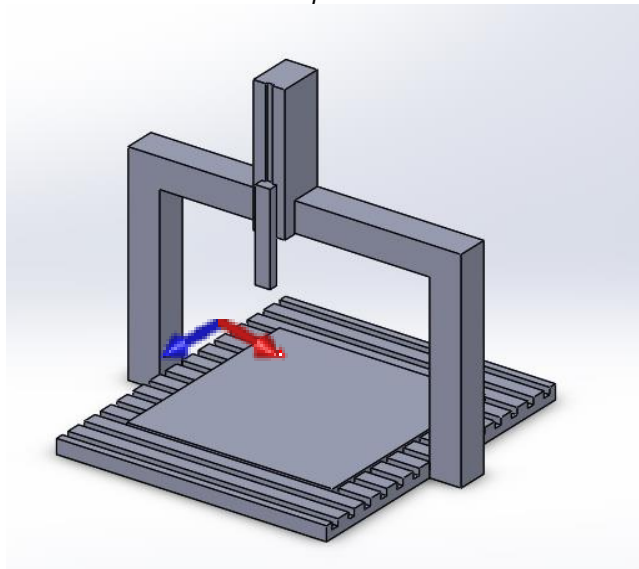


Fuente: Autor del proyecto, (2017)

❖ **Diseño 2**

La segunda alternativa de diseño (Ilustración 6), está compuesta por una mesa de trabajo y un bastidor en forma de U en donde se apoya la herramienta, su diseño se basa en perfiles de aluminio para la estructura y una lámina de más peso para la mesa de apoyo en donde se desliza otra plataforma en los ejes (X, Y), la ventaja de este diseño es su estabilidad y que se puede sujetar de manera más sencilla el bloque de material para trabajar.

Ilustración 6 Propuesta de Diseño 2



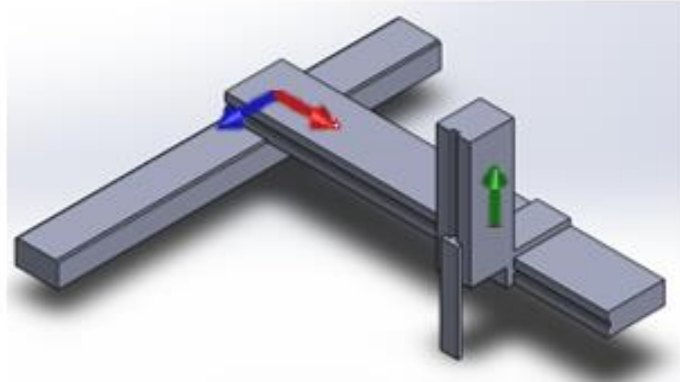
Fuente: Autor del proyecto, (2017)

❖ **Diseño 3**

La tercera y última alternativa de diseño (Ilustración 7), consiste en la conexión de 3 brazos cada uno correspondiente a un eje (X, Y, Z), la gran ventaja de esta alternativa es su bajo peso y facilidad para transportarlo, sin embargo tiene una gran desventaja y es que no permitiría la implementación del mismo en un área

de trabajo mayor ya que se concentrarían los esfuerzos por solo estar apoyado en un extremo de la articulación

Ilustración 7 Propuesta de Diseño 3



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

6.2.3 Selección de la Alternativa de Diseño

A continuación se realiza la comparación correspondiente entre las propuestas que se tienen, teniendo como parámetros principales los requerimientos del cliente definidos al inicio.

En la Tabla 5 se presenta la evaluación de las propuestas respecto a los requerimientos del cliente con su respectiva ponderación que son utilizadas como punto de partida para la evaluación de cada alternativa, se le da entonces a cada requerimiento por alternativa una calificación la cual ayuda a determinar dependiendo el mayor valor obtenido la alternativa más viable en cuanto a todos los aspectos mencionados.

Tabla 5 Calificación Propuestas de Diseño

			Propuesta 1		Propuesta 2		Propuesta 3	
Requerimientos del cliente	%		Calificacion	Valor	Calificacion	Valor	Calificacion	Valor
1 Bajo consumo de energía	10,53%		4	0,42105263	3,8	0,4	4,5	0,47368421
2 Presicion	26,32%		4	1,05263158	4	1,052631579	4	1,05263158
3 Cumpla con la velocidad de avance	10,53%		4	0,42105263	4	0,421052632	4	0,42105263
4 Economica	21,05%		5	1,05263158	3,8	0,8	3,8	0,8
5 Robusto	10,53%		4,5	0,47368421	5	0,526315789	3,5	0,36842105
6 Material de Construcción	21,05%		5	1,05263158	4,6	0,968421053	4,5	0,94736842
Calificacion			4,473684211		4,168421053		4,063157895	

Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Teniendo en cuenta las calificaciones obtenidas por cada una de las propuestas, se hace evidente de que la propuesta número 1 es la más apropiada, siendo esta entonces la más conveniente para alcanzar el objetivo planteado, igualmente es la opción que permite satisfacer mejor las características del cliente y especificaciones de diseño definidas. Sin embargo si en el desarrollo del proyecto se ve oportuna la implementación de alguna de las características de las otras dos propuestas se podrían implementar siempre y cuando no afecten con el funcionamiento óptimo de la propuesta ya seleccionada.

6.3 REALIZACIÓN DEL MODELO DEL ROBOT EN SOLIDWORKS

Se realiza un modelo CAD de cómo quedaría el robot, con el fin de verificar las geometrías, ubicar de manera correcta los taladros y fresados que sean necesarios para poder construir el robot y obtener las propiedades físicas necesarias para realizar los cálculos pertinentes. A continuación se muestran los modelos por subconjunto y un modelo final con todo el robot armado. Los planos por pieza se podrán encontrar en el apartado de anexos.

Estos modelos fueron realizados con el software de diseño SolidWorks que se encuentra disponible en las salas de cómputo de la Universidad Libre y que fue puesto a disposición del autor del proyecto para realizar las actividades requeridas.

6.3.1 Modelo del subconjunto Z

Ilustración 8 Modelo subconjunto z



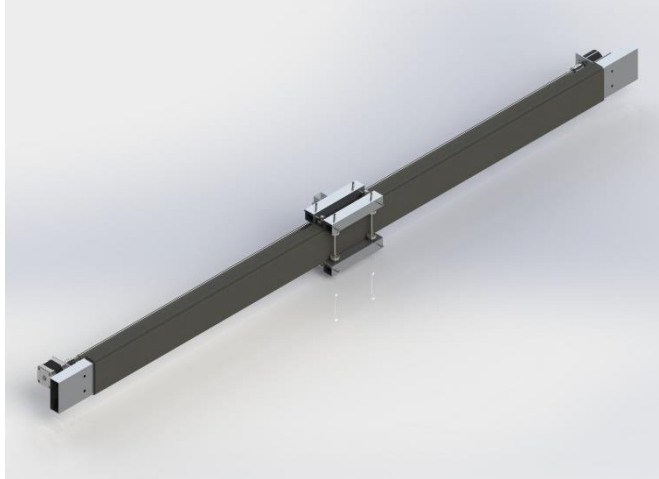
Fuente: Autor del proyecto, (2017)

En la Ilustración 8 se presenta el subconjunto para el desplazamiento en el Z, está compuesto por una estructura chapa metálica CR calibre 12 que se consigue comercialmente en los distribuidores locales, esta estructura sirve de apoyo para el mecanismo que estará a cargo de realizar el desprendimiento del material en el bloque inicial, también está compuesto por 2 rodamientos lineales que se deslizan sobre dos varillas lisas de 8mm de diámetro que eliminan la rotación del elemento, de igual forma tiene 1 tuerca que será la encargada de convertir los movimientos rotacionales de la varilla roscada en movimientos lineales a lo largo del eje Z. Dispone de un motor a pasos dispositivo electromecánico que se encargara del otorgar el movimiento del eje, está anclado a un carro fabricado en perfiles de aluminio de 1x1 pulgadas el cual tiene

dispuestos unos rodamientos radiales para que faciliten el movimiento a lo largo del eje Y, se pensó en este tipo de perfil por su dimensión ya que facilitaría el anclaje del subconjunto Z a el mismo.

6.3.2 Modelo del subconjunto Y

Ilustración 9 Sub Conjunto Y



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

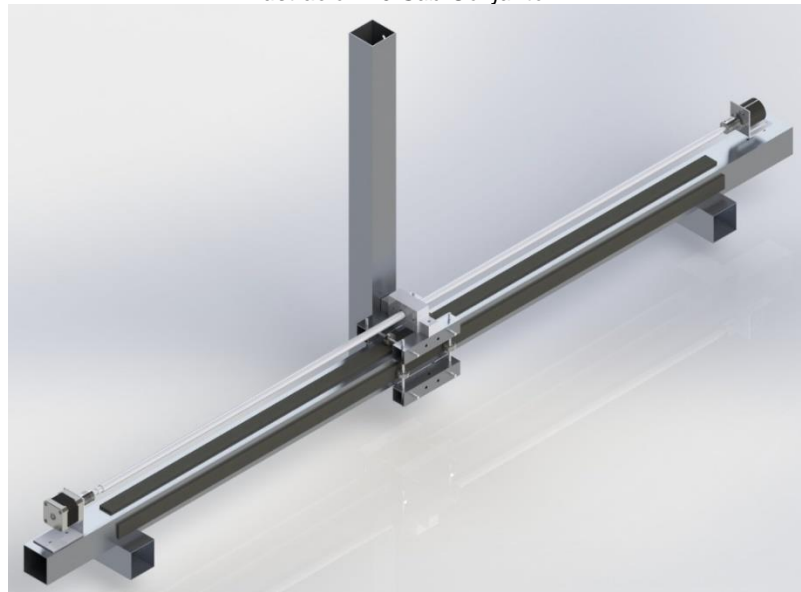
En la Ilustración 9 se observa cómo estará conformado el conjunto encargado de apoyar y dar movimiento a el mecanismo Z a lo largo del eje Y, este mecanismo estará compuesto por un perfil de aluminio estructural de 3x1 pulgadas tipo rectangular horizontal en donde se apoyará el carro que transmitirá el movimiento al subconjunto Z, se pre eligió este perfil debido al bajo peso, a que es necesario ubicar el motor en él por lo que físicamente se necesita de al menos el mismo ancho del motor ósea mínimo 45 mm, además de eso se necesita una suficiente superficie de apoyo para el carro, se forro con caucho duro para minimizar el rose con los rodamientos y evitar el desgaste de las piezas, el carro se pensó en ser fabricado en perfil de aluminio cuadrado de 1x1 pulgadas en donde se anclara el subconjunto Z, se pensó en este tipo de perfil específico debido a la geometría con la que quedaría dicho carro al final ya que este perfil daría la robustez necesaria y facilitaría la ubicación de la pieza en donde se ubicaría la tuerca y los rodamientos que permitirán el libre desplazamiento del mismo, está ubicado también el motor que moverá el tornillo que guiará al subconjunto Z.

6.3.3 Modelo del subconjunto X

El movimiento en el eje X lo transmitirán 3 piezas ilustración 10 compuestas por una columna en aluminio de 2x2 pulgadas que unirá el movimiento en X con el subconjunto Y en ambos extremos del mismo, en su base estará conectado a un carro también compuesto por tubos de aluminio de 1x1 pulgadas igual que el carro del subconjunto Y, este se deslizará sobre un perfil de aluminio igual de 2x2 pulgadas ubicado de forma horizontal, se escogió este perfil tentativamente de igual forma para tener la suficiente área para apoyar el motor que se seleccione, de igual forma se pegará un listón de caucho duro en toda la mitad

del perfil por donde circularan los rodamientos también para reducir el desgaste y la fricción.

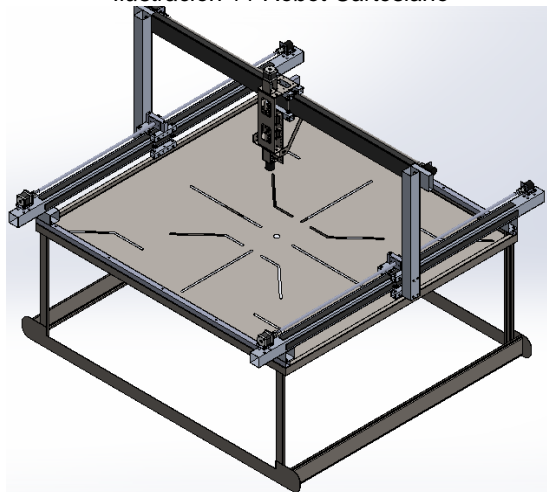
Ilustración 10 Sub Conjunto X



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

En la Ilustración 11 se presenta como quedaría diseñado el robot cartesiano con los requerimientos anteriormente descritos, añadiéndole una mesa realizada en chapa metálica que servirá de apoyo en un futuro para el material que se llegue a mecanizar, de igual forma sirve para darle un poco de altura a el robot para que se facilite el trabajo a la hora de montar el material a mecanizar y para trabajar en él.

Ilustración 11 Robot Cartesiano



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Una vez definido el diseño, los posibles perfiles y geometrías se puede proceder a realizar los cálculos en base a las propiedades físicas del modelo realizado en 3D. Dichos cálculos corresponden a estructurales, a características mínimas que

necesitaría el motor para poder llegar a realizar el mecanizado de la espuma y cálculos del torque necesario para los motores.

6.4 CÁLCULOS DE LAS PARTES ESTRUCTURALES

6.4.1 Cálculo de estructura del eje Y

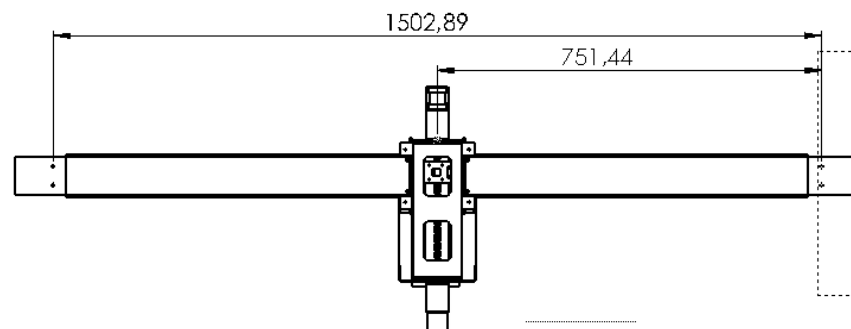
Se procederá entonces primero a realizar el cálculo del perfil de 3x2 pulgadas que soporta el mecanismo de Z y que está apoyado en los extremos, para este cálculo se deben tener en cuenta dos escenarios, primero cuando la carga del eje Z está en toda la mitad y segundo cuando está en uno de los extremos. Ya que en estos dos momentos es cuando se presentarían el Cortante máximo y la flexión máxima.

▪ Carga Z en la mitad de la viga.

Como se mencionó anteriormente se procede a realizar el primer cálculo cuando la carga del mecanismo Z está en la mitad de la viga.

A continuación en la Ilustración 12 se muestran las distancias desde el punto de apoyo de la carga respecto a la viga principal de Y

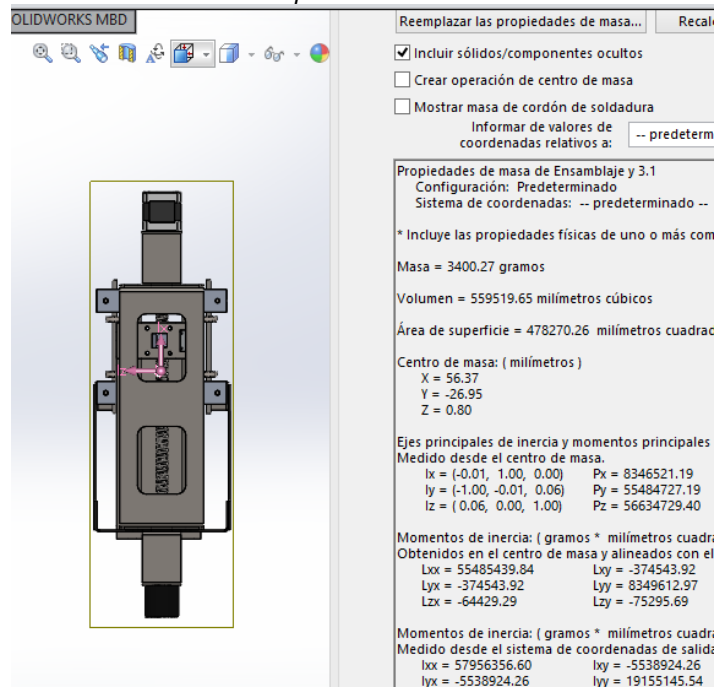
Ilustración 12 Carga de Z en mitad de la viga de Y



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

La Carga que soporta esta viga es la equivalente a el peso del mecanismo Z, entonces se obtiene este valor de masa a partir de la herramienta de cálculo de propiedades físicas de SolidWorks (Ilustración 13), ya que todos los materiales están definidos acorde con los que se conseguirían comercialmente.

Ilustración 13 Propiedades físicas mecanismo Z



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Como se observa en la Ilustración 13 el valor de la masa del mecanismo de Z es de aproximadamente 3400 gramos, a este valor se le suma la masa promedio de un motortool que podría ser utilizado para el proceso de mecanizado el cual corresponde a aproximadamente 550 gramos, así pues (W_z) la carga que genera el mecanismo Z es:

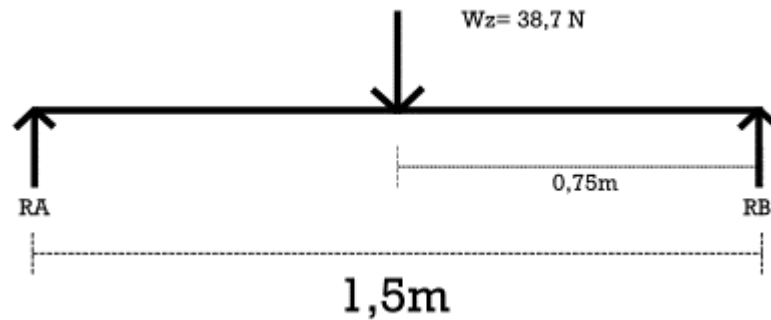
$$W_z = 3,95 \text{ kg} * 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$W_z = 38,7 \text{ N}$$

Ahora se desarrolla el diagrama de cuerpo libre y se realizan los cálculos pertinentes para hallar el valor del Cortante máximo y Flexión máxima y poder determinar los esfuerzos principales que soportan la viga y determinar si la seleccionada puede soportar los esfuerzos sin ningún problema.

Se genera entonces el diagrama de cuerpo libre que representa el caso con las distancias y reacciones (RA y RB) acordes (Ilustración 14).

Ilustración 14 Diagrama de cuerpo libre mecanismo Z en medio de la viga Y



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Para calcular las reacciones se realiza la sumatoria de fuerzas y de momentos y se despejan:

$$\Sigma F_y = R_A + R_B - 38.7 \text{ N} = 0$$

Se asumen los momentos en sentido de las agujas del reloj como positivos:

$$\Sigma M_B = (38.7 \text{ N} * 0.75\text{m}) - R_B * 1.5\text{m} = 0$$

Se despeja R_B de la anterior expresión:

$$R_B = \frac{38.7 \text{ N} * 0.75\text{m}}{1.5 \text{ m}}$$

$$\mathbf{R_B = 19,35 \text{ N}}$$

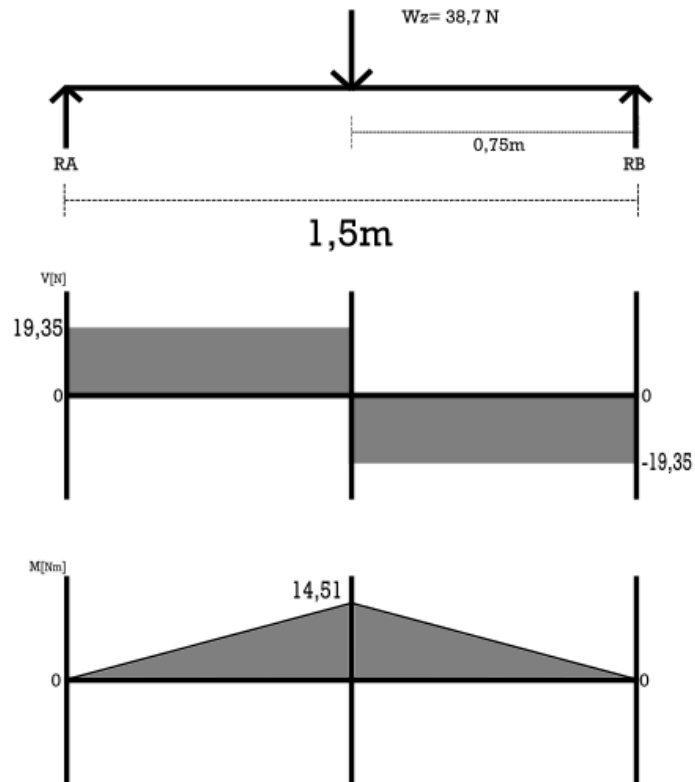
Con el valor de R_B se despeja de la primera ecuación el valor de R_A :

$$R_A = 38.7 \text{ N} - 19,35\text{N}$$

$$\mathbf{R_A = 19,35\text{N}}$$

Conocidos estos dos valores procedemos a realizar el diagrama de cortante y flexión para encontrar los valores máximos de los mismos (Ilustración 15).

Ilustración 15 Diagrama de cortante y flexión mecanismo Z en medio de la viga Y



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Como se observa en el diagrama el máximo valor del cortante es de 19,35 N y el momento flector máximo es 14, 51 Nm.

Con estos valores se procede a encontrar el valor del esfuerzo normal Ecuación 1 y el esfuerzo cortante Ecuación 3, una vez encontrados estos valores se calculan los esfuerzos principales, los cuales se comparan con el Esfuerzo máximo a la fluencia del aluminio a usar y se encuentra un factor de seguridad. Se realizará el cálculo para el perfil más pequeño que se encuentra comercialmente tipo rectangular y así comprobar cuál es la geometría mínima necesaria para que el material no falle.

$$\sigma_y = \frac{M c}{I} \quad (1)$$

Donde:

M: Momento aplicado.

C: Distancia a la fibra neutra.

I: momento de inercia alrededor del eje neutro.

Para encontrar el momento de inercia total debido a que el perfil es de pared delgada se debe hallar el momento de inercia para los dos rectángulos que se forman y se resta del mayor el menor, comercialmente el perfil más pequeño que se consigue mide 1 ½ x 3/4x0.05 pulgadas.

Para encontrar la inercia de un rectángulo se utiliza la Ecuación 2:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (2)$$

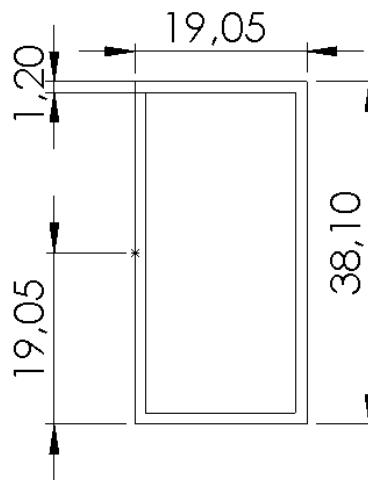
Donde:

B: Base

h: Altura

A partir de la ilustración 16 se obtiene los valores de b y h, entonces:

Ilustración 16 Geometría perfil 1 ½ pulgada x ¾ pulgada



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

$$I = \frac{19.05 * 38.10^3}{12} - \frac{16.65 * 35.7^3}{12}$$

$$I = 2,47 * 10^{-8} m^4$$

Así entonces el esfuerzo normal es:

$$\sigma_y = \frac{14,51 Nm * (19.05 * 10^{-3} m)}{2,47 * 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma_y = 11.2 Mpa$$

$$\tau_{xy} = \frac{VQ}{It} \quad (3)$$

Donde:

V: Carga Aplicada

Q: Primer momento del área

I: Momento de Inercia

t: Espesor de pared

El primer momento del área se obtiene de la Ecuación 4 multiplicando el área del rectángulo sobre el que aplica la carga por la coordenada del eje de ese nuevo rectángulo respecto al centroide de la figura completa:

$$Q = \bar{y} \bar{A} \quad (4)$$

$$Q = 18,45 \text{ mm} * (19,05 \text{ mm} * 1,2 \text{ mm})$$

$$Q = 421,8 \text{ mm}^3 \approx 4,22 * 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\tau_{xy} = \frac{19,35 \text{ N} * (4,22 * 10^{-7} \text{ m}^3)}{(2,47 * 10^{-8} \text{ m}^4)(1,2 * 10^{-3} \text{ m})}$$

$$\tau_{xy} = 275,5 \text{ Kpa}$$

Ahora es posible determinar los esfuerzos principales en el punto a partir de la Ecuación 5:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \frac{11,2 \text{ Mpa}}{2} + \sqrt{\left(\frac{0 - 11,2 \text{ Mpa}}{2}\right)^2 + 275,5 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{11,2 \text{ Mpa}}{2} - \sqrt{\left(\frac{0 - 11,2 \text{ Mpa}}{2}\right)^2 + 275,5 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_1 = 11,2 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = -6,77 \text{ Kpa}$$

Como se observa entonces el esfuerzo máximo aplicado a la viga es de 11,2 Mpa, ahora según el Anexo A facilitado por uno de los proveedores de perfiles

de aluminio, se encuentra que el Esfuerzo a la fluencia de la aleación 6063 que es en la que están hechos esos perfiles y corresponde a un valor de 50Mpa. A partir de la Ecuación 6 se encuentra el factor de seguridad.

$$Nf = \frac{Sy}{\sigma_r} \quad (6)$$

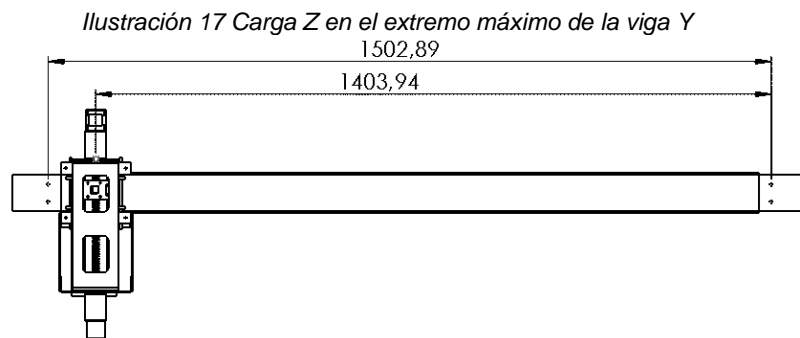
$$Nf = \frac{50 \text{ Mpa}}{11,2 \text{ Mpa}} = 4.46$$

Se observa que el factor de seguridad dio mucho mayor a 1 por lo que se concluye que el perfil seleccionado no va a fallar y soportar las cargas sometidas.

▪ **Carga Z en el extremo máximo de la viga.**

Se procede a realizar el segundo cálculo cuando la carga del mecanismo Z está en el extremo máximo de la Viga.

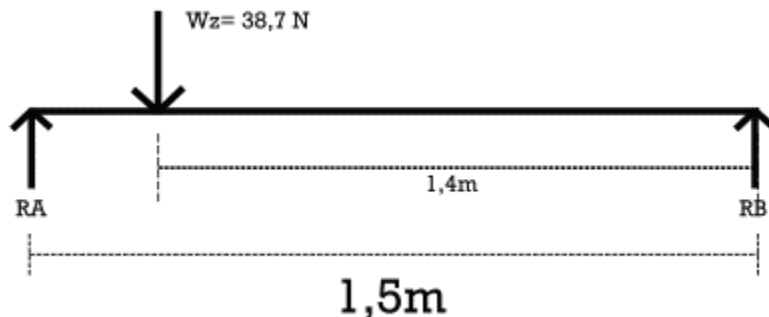
En la Ilustración 17 se muestran las distancias desde el punto de apoyo de la carga respecto a la viga principal de Y.



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Se genera entonces el diagrama de cuerpo libre que representa el caso con las distancias y reacciones acordes (Ilustración 18).

Ilustración 18 Diagrama de cuerpo libre mecanismo Z en el extremo máximo de la viga Y



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

$$\Sigma Fy = RA + RB - 38.7 \text{ N} = 0$$

Se asumen los momentos en sentido de las agujas del reloj como positivos:

$$\Sigma M_B = (38.7 \text{ N} * 0.75\text{m}) - R_A * 1.5\text{m} = 0$$

Se despeja R_A de la anterior ecuación:

$$R_A = \frac{38.7 \text{ N} * 1.4\text{m}}{1,5 \text{ m}}$$

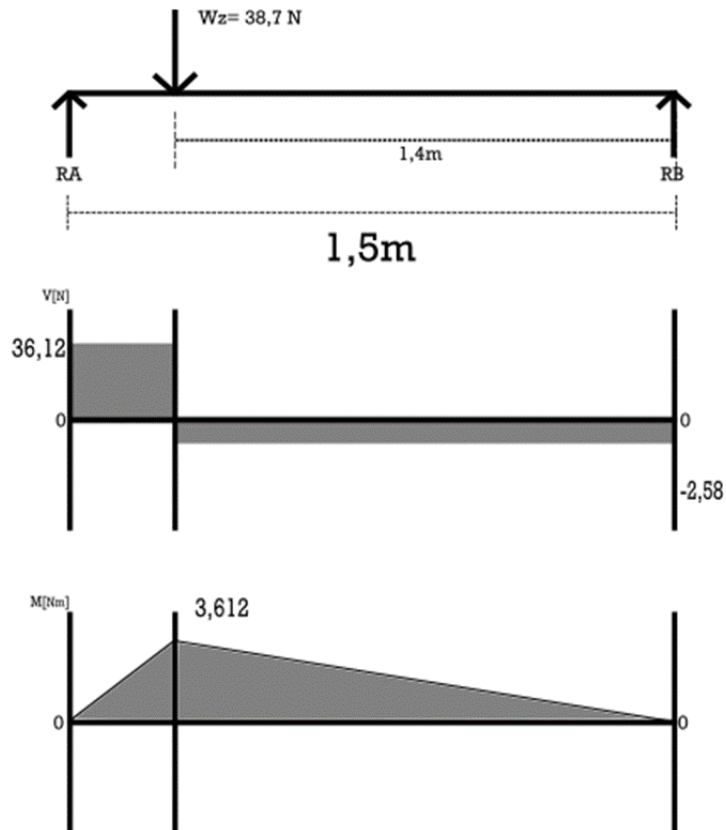
$$R_A = 36,12 \text{ N}$$

Con el valor de R_A se despeja de la primera ecuación el valor de R_B :

$$R_B = 38.7 \text{ N} - 36,12\text{N}$$

$$R_B = 2,58\text{N}$$

Ilustración 19 Diagrama de cortante y flexión mecanismo Z en el extremo máximo de la viga Y



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Como se observa en la Ilustración 19 el máximo valor del cortante es de 36,12 N y el momento flector máximo es 3,612 Nm.

A partir de la Ecuación 1 se obtiene el esfuerzo normal

$$\sigma_y = \frac{3,612 \text{ Nm} * (19.05 * 10^{-3} \text{ m})}{2,47 * 10^{-8} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_y = 2.78 \text{ Mpa}$$

De la Ecuación 3 se obtiene el cortante:

$$\tau_{xy} = \frac{36,12 \text{ N} * (4,22 * 10^{-7} \text{ m}^3)}{(2,47 * 10^{-8} \text{ m}^4)(1,2 * 10^{-3} \text{ m})}$$

$$\tau_{xy} = 514,3 \text{ Kpa}$$

Obtenido el esfuerzo normal y cortante, se encuentran con la Ecuación 5 los esfuerzos principales

$$\sigma_1 = \frac{2.78 \text{ Mpa}}{2} + \sqrt{\left(\frac{0 - 2,78 \text{ Mpa}}{2}\right)^2 + 514,3 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{2.78 \text{ Mpa}}{2} - \sqrt{\left(\frac{0 - 2,78 \text{ Mpa}}{2}\right)^2 + 514,3 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_1 = 2,87 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = -92.09 \text{ Mpa}$$

Como se observa entonces el esfuerzo máximo aplicado a la viga en este caso es de 2,87 Mpa.

Entonces de la Ecuación 6

$$Nf = \frac{55 \text{ Mpa}}{2,87 \text{ Mpa}} = 19.16$$

Basados en los dos factores de seguridad obtenidos, se observa que la viga del eje Y se podría fabricar con un perfil de estas dimensiones, sin embargo debido a la geometría del mecanismo del subconjunto z, a que un motor paso a paso mínimo mide 45 mm y que es necesario poder fijarlo en la cara más ancha de este perfil, este no permitiría anclar dicho motor directamente si no es con la adición de alguna otra pieza, haciendo más complicada el ensamble del mismo. De igual forma la cara más delgada del perfil tiene que ser por lo menos del mismo tamaño que los perfiles usados en los carros de 1 pulgada, ya que si esta medida es menor, dichos perfiles rozarían entre si dificultando el libre movimiento del mecanismo y agregando más fuerza y torque del necesario a el motor, por

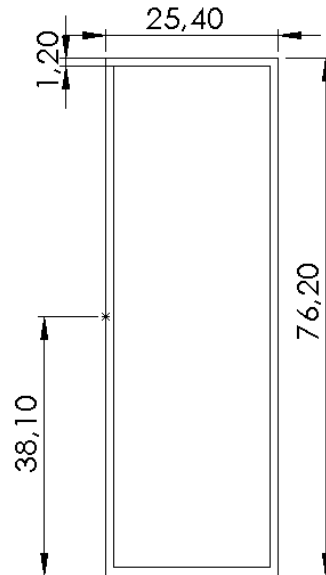
estas razones se seleccionó en el momento de diseño CAD un perfil de 3x1 pulgada al cual se le realizarán los mismos cálculos anteriores para obtener los valores del factor de seguridad.

Como se mencionó anteriormente se realizarán los cálculos a el perfil de 3x1 pulgadas, de igual forma en los cálculos anteriores se observa que el mayor esfuerzo se presenta en el primer caso en donde la carga está en la mitad de la viga (Ilustración 12), así entonces solo se le realizó el cálculo en ese momento a el perfil de 3x1 pulgadas:

Basados en las ecuaciones anteriores:

A partir de la Ilustración 20 se obtiene los valores de b y h, entonces:

Ilustración 20 Geometría perfil 3 pulgada x 1 pulgada



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Entonces con la Ecuación 2

$$I = \frac{25.4 * 76,2^3}{12} - \frac{23 * 73.8^3}{12}$$

$$I = 1.66 * 10^{-7} m^4$$

Así entonces el esfuerzo normal de la Ecuación 1 es:

$$\sigma_y = \frac{14,51 Nm * (38.10 * 10^{-3} m)}{1.66 * 10^{-7} m^4}$$

$$\sigma_y = 3.3 Mpa$$

De igual forma el esfuerzo cortante de la Ecuación 3 corresponde:

$$Q = 1143 \text{ mm}^3 \approx 1,143 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\tau_{xy} = \frac{19.35 \text{ N} * (1,143 * 10^{-6} \text{ m}^3)}{(1,66 * 10^{-7} \text{ m}^4)(1,2 * 10^{-3} \text{ m})}$$

$$\tau_{xy} = 111,02 \text{ Kpa}$$

Ahora es posible determinar los esfuerzos principales en el punto a partir de la Ecuación 5:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{3.3 \text{ Mpa}}{2} + \sqrt{\left(\frac{0 - 3.3 \text{ Mpa}}{2}\right)^2 + 111.02 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{3.3 \text{ Mpa}}{2} - \sqrt{\left(\frac{0 - 3.3 \text{ Mpa}}{2}\right)^2 + 111.02 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_1 = 3.3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = -3.73 \text{ Kpa}$$

Comparando este esfuerzo con el esfuerzo a la fluencia de un aluminio 6063 se encuentra el factor de seguridad de la Ecuación 6.

$$Nf = \frac{50 \text{ Mpa}}{3.3 \text{ Mpa}} = 15.15$$

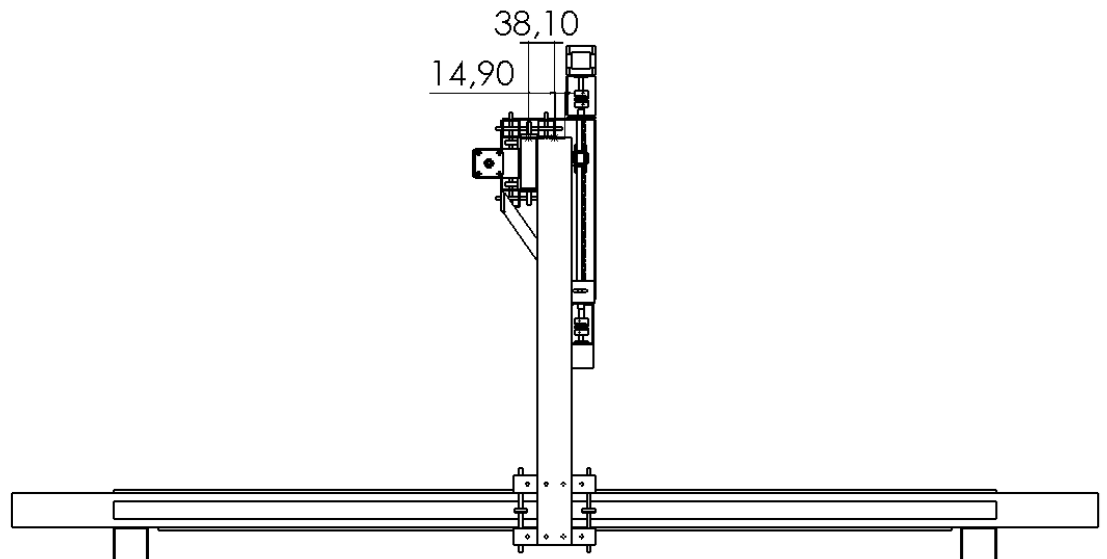
Como se esperaba el perfil de 3x1 pulgadas sobrepasa los requerimientos para soportar la carga sometida, de igual forma como se mencionó anteriormente permite la construcción y ubicación de los elementos sobre él, agregando beneficios al robot para su construcción.

6.4.2 Cálculo de estructura del eje X

Al igual que para la viga del eje Y, para la viga que soportará y servirá de guía para el eje X se analizarán los esfuerzos cuando se encuentra en la mitad del recorrido la carga, para hallar así los esfuerzos máximos a los que será sometida dicha viga.

Como se observa en la Ilustración 21 hay dos fuerzas desplazadas del eje central de la columna que traslada las fuerzas a la viga horizontal en X, una desplazada 14.9 mm y otra desplazada 38.10 mm estas fuerzas equivalen a los centros de masa del conjunto Z (F1) y Y (F2) respectivamente, estas fuerzas generan unos momentos que se trasladan a la viga para así entonces proceder a realizar el diagrama de cuerpo libre que representa la distribución de fuerzas.

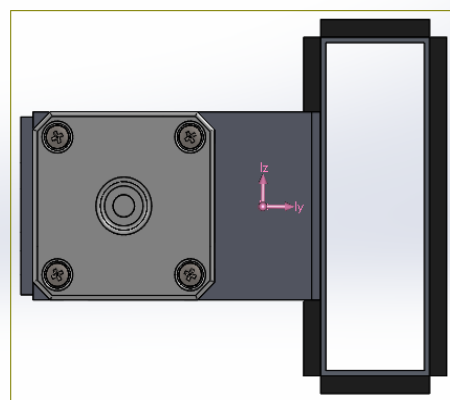
Ilustración 21 Carga total sobre la viga X



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

La fuerza 1 (F1) corresponde a la masa de la viga seleccionada para el eje Y (Ilustración 22) y la fuerza 2 (F2) corresponde al mismo valor de Wz mencionado anteriormente.

Ilustración 22 Propiedades físicas eje Y



<input type="checkbox"/> Crear operación de centro de masa <input type="checkbox"/> Mostrar masa de cordón de soldadura Informar de valores de coordenadas relativos a: -- predeterminado --		
Propiedades de masa de Ensamblaje y 3.1 Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado --		
* Incluye las propiedades físicas de uno o más componentes/sólidos ocultos		
Masa = 4678.60 gramos		
Volumen = 1925649.89 milímetros cúbicos		
Área de superficie = 1428334.55 milímetros cuadrados		
Centro de masa: (milímetros)		
X = -26.21		
Y = 0.02		
Z = 90.80		
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)		
Medido desde el centro de masa.		
Ix = (0.01, 0.00, 1.00)	Px = 6373541.92	
Iy = (1.00, -0.01, 0.01)	Px = 1096405809.58	
Iz = (0.01, 1.00, 0.00)	Pz = 1098699301.99	
Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)		
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas		
Lxx = 1096237477.98	Lyy = -15165.26	Lzz = -13548378.3
Lyx = -15165.26	Lyy = 1098699207.65	Lyz = 52842.62
Lzx = -13548378.34	Lzy = 52842.62	Lzz = 6541967.86

Fuente: Autor del proyecto, (2017)

$$W_y = 4,67 \text{ kg} * 9,8 \frac{m}{s^2}$$

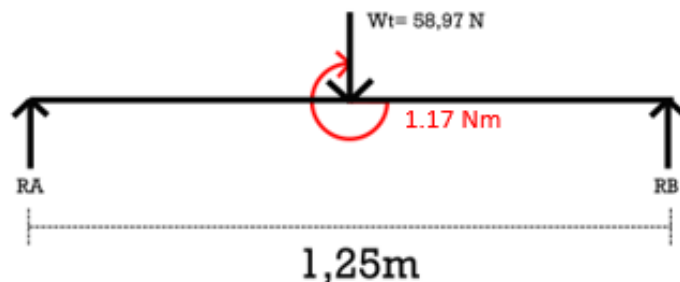
$$W_y = 45,7 \text{ N}$$

Para el cálculo de la viga X se tiene en cuenta el segundo caso de la viga Y es decir cuando la carga de Z está en el extremo, ya que es en este punto cuando la viga X soporta mayor carga. Así entonces la carga que soporta X (W_t) va a ser la sumatoria de la mayor reacción calculada para Y y la suma de la mitad de W_y ya que son dos las vigas que servirán de apoyo en X por lo tanto el peso de la viga Y esta siempre repartido entre las dos vigas de X, mientras que el efecto de la fuerza de Z sobre la viga X depende del lugar en donde se posicione a lo largo de Y.

Ahora se desarrolla el diagrama de cuerpo libre y se realizan los cálculos pertinentes para hallar el valor del Cortante máximo y Flexión máxima y poder determinar los esfuerzos principales que soportan la viga y determinar si la seleccionada puede soportar los esfuerzos sin ningún problema.

Se genera entonces el diagrama de cuerpo libre que representa el caso con las distancias y reacciones acordes (Ilustración 23).

Ilustración 23 Diagrama de cuerpo libre viga X



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

$$W_t = \frac{W_y}{2} + R_A$$

$$W_t = 22.85 \text{ N} + 36.12 \text{ N}$$

$$W_t = 58.97 \text{ N}$$

El momento (M) se obtiene a partir de la sumatoria del momento ejercido por F1 y F2. Asumiendo positivo la dirección de las agujas de reloj se obtiene:

$$\begin{aligned} M &= (F_1 \times 14.9 \times 10^{-3}) - (F_2 \times 38.1 \times 10^{-3}) \\ M &= (38.7 \text{ N} \times 14.9 \times 10^{-3}) - (45.7 \text{ N} \times 38.1 \times 10^{-3}) \\ M &= (0.57 \text{ Nm}) - (1.74 \text{ Nm}) \end{aligned}$$

$$M = -1.17 \text{ Nm}$$

Como se observa el momento concentrado resulto con signo negativo, lo que indica que el sentido de giro es opuesto a las manecillas del reloj.

Para calcular las reacciones se realiza la sumatoria de fuerzas y de momentos y se despejan:

$$\Sigma F_y = R_A + R_B - 58.97 \text{ N} = 0$$

Se asumen los momentos en sentido de las agujas del reloj como positivos:

$$\Sigma M_B = (R_A * 1.25\text{m}) - (58.97 \text{ N} * 0.625\text{m}) - 1.17 \text{ Nm} = 0$$

Se despeja R_A :

$$R_A = \frac{(58.97 \text{ N} * 0.625\text{m}) + 1.17 \text{ Nm}}{1.25 \text{ m}}$$

$$\mathbf{R_A = 30.42 \text{ N}}$$

Con el valor de R_A se despeja el valor de R_B :

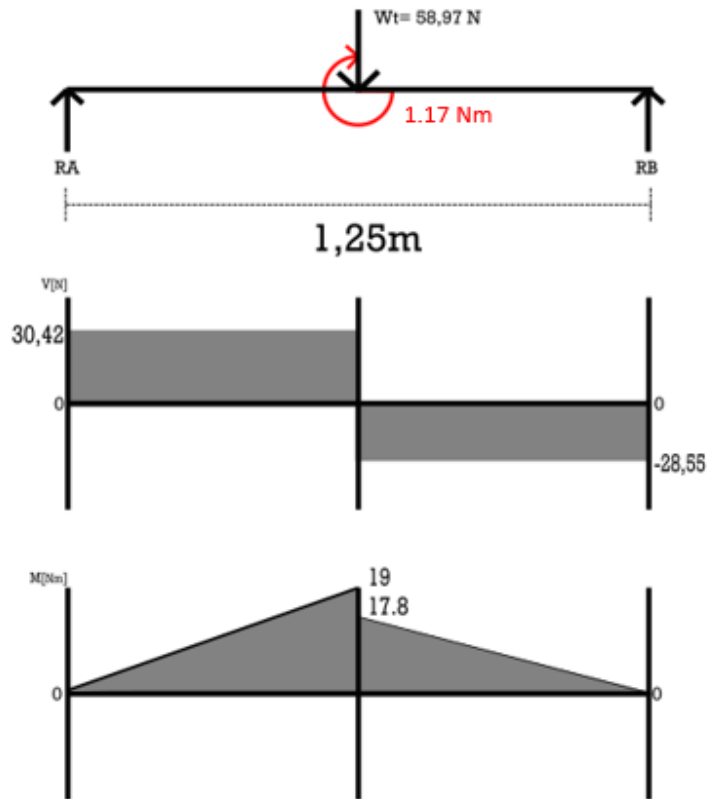
$$R_B = 58.97 \text{ N} - 30.42 \text{ N}$$

$$\mathbf{R_B = 28.55 \text{ N}}$$

Conocidos estos dos valores se procede a realizar el diagrama de cortante y flexión para encontrar los valores máximos de los mismos.

Como se observa en el diagrama (Ilustración 24) el máximo valor del cortante es de 30.42 N y el momento flector máximo es 19,01 Nm.

Ilustración 24 Diagrama de cortante y flexión viga X



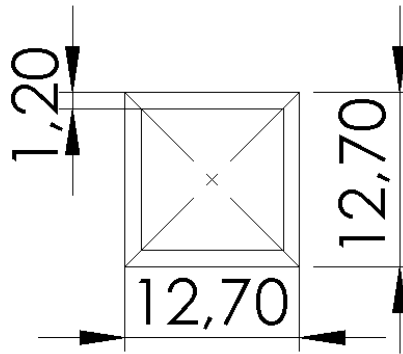
Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Para esta viga se decidió optar por un perfil cuadrado, debido a que como la viga del eje Y está sujeta en ambos extremos por columnas que trasladan el movimiento en dos ejes horizontales en dirección X, restringen totalmente el movimiento perpendicular al eje X del carro por lo que no es necesario tener un lado más ancho en el perfil, es decir con uno cuadrado se asegura que el carro en X queda totalmente restringido en movimiento lateral y perpendicular, y solo se moverá en la dirección del eje empujado por el motor.

Comercialmente el perfil cuadrado de aluminio más pequeño que se consigue es de $\frac{1}{2} \times 236.22$ pulgadas con 0.05 pulgadas de espesor por lo que se iniciará con esta geometría como referencia para encontrar el perfil mínimo que cumpliría con las condiciones de trabajo a las que estará sometido.

Basado en lo mostrado en la Ilustración 25 se obtiene los valores de b igual a h, entonces:

Ilustración 25 Geometría perfil cuadrado de ½ pulgada



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

De la Ecuación 2 se obtiene:

$$I = \frac{12.7^4}{12} - \frac{10.3^4}{12}$$

$$I = 1,23 * 10^{-9} m^4$$

Así entonces el esfuerzo normal aplicando la Ecuación 1 es:

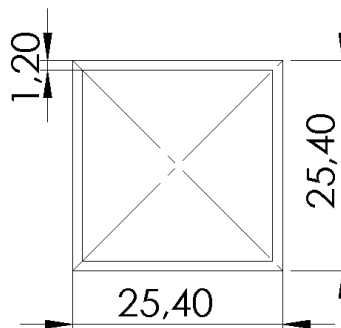
$$\sigma_y = \frac{19.01 Nm * (6.35 * 10^{-3} m)}{1.23 * 10^{-9} m^4}$$

$$\sigma_y = 98.14 Mpa$$

Como se observa el esfuerzo resultante en este tipo de perfil sobrepasa el esfuerzo de fluencia del aluminio por lo que de una vez se puede descartar y pasar al siguiente disponible en la industria que corresponde a un perfil cuadrado de 1x 236.22 pulgadas con un espesor de 0.05 pulgadas.

Basado en lo mostrado en la Ilustración 26 se obtiene los valores de b igual a h, entonces:

Ilustración 26 Geometría perfil cuadrado de 1 pulgada



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

De la Ecuación 2 se obtiene:

$$I = \frac{25.4^4}{12} - \frac{23^4}{12}$$

$$I = 1,13 * 10^{-8} m^4$$

El esfuerzo normal a partir de la Ecuación 1 es:

$$\sigma_y = \frac{19.01 Nm * (12.7 * 10^{-3} m)}{1.13 * 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma_y = 21.36 Mpa$$

El esfuerzo cortante se obtiene de la Ecuación 3 y la Ecuación 4:

$$Q = 12,1 mm * (25.4 mm * 1.2 mm)$$

$$Q = 368.8 mm^3 \approx 3.68 * 10^{-7} m^3$$

$$\tau_{xy} = \frac{30.42 N * (3.68 * 10^{-7} m^3)}{(1.13 * 10^{-8} m^4)(1.2 * 10^{-3} m)}$$

$$\tau_{xy} = 825,5 Kpa$$

Usando la Ecuación 5 se obtiene:

$$\sigma_1 = \frac{21.36 Mpa}{2} + \sqrt{\left(\frac{0 - 21.36 Mpa}{2}\right)^2 + 825.5 Kpa^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{21.36 Mpa}{2} - \sqrt{\left(\frac{0 - 21.36 Mpa}{2}\right)^2 + 825.5 Kpa^2}$$

$$\sigma_1 = 21.4 Mpa$$

$$\sigma_2 = -31.85 Kpa$$

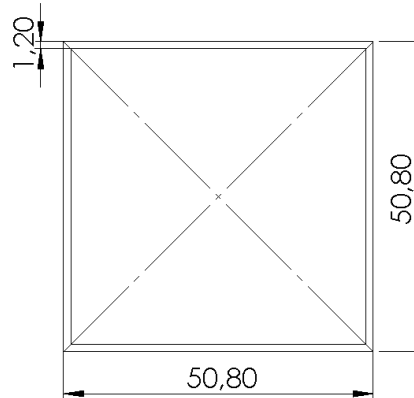
Se calcula el factor de seguridad de la Ecuación 6

$$Nf = \frac{Sy}{\sigma} = \frac{50 Mpa}{21.4 Mpa} = 2.3$$

Se observa que el factor de seguridad es mayor a 1, es decir que a partir de esta geometría de perfil se puede iniciar la selección del mismo, para este perfil

también se debe tener en cuenta que es necesario poder apoyar el motor mencionado anteriormente por lo que mínimo se necesita un espacio de 45 mm para poder ubicarlo sin necesidad de una pieza adicional, por esta razón y debido a que se encuentra el perfil en la industria se selecciona un perfil cuadrado de 2 x 236.22 pulgadas con un espesor de 0.005 pulgadas (Ilustración 27).

Ilustración 27 Geometría perfil cuadrado de 2 pulgada



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

De la Ecuación 2 se despeja:

$$I = \frac{50.8^4}{12} - \frac{48.4^4}{12}$$

$$I = 9,76 * 10^{-8} m^4$$

El esfuerzo normal Ecuación 1 es:

$$\sigma_y = \frac{19.01 Nm * (25.4 * 10^{-3} m)}{9.76 * 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma_y = 4.9 Mpa$$

Esfuerzo cortante Ecuación 3 y Ecuación 4 es:

$$Q = 24.8 mm * (50.8 mm * 1.2 mm)$$

$$Q = 1511.8 mm^3 \approx 1.51 * 10^{-6} m^3$$

$$\tau_{xy} = \frac{30.42 N * (1.51 * 10^{-6} m^3)}{(9.76 * 10^{-8} m^4)(1.2 * 10^{-3} m)}$$

$$\tau_{xy} = 392.2 Kpa$$

Se calculan ahora el esfuerzo principal a partir de la Ecuación 5:

$$\sigma_1 = \frac{4.9 \text{ Mpa}}{2} + \sqrt{\left(\frac{0 - 4.9 \text{ Mpa}}{2}\right)^2 + 392.2 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{4.9 \text{ Mpa}}{2} - \sqrt{\left(\frac{0 - 4.9 \text{ Mpa}}{2}\right)^2 + 392.2 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_1 = 4.93 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = -31.19 \text{ Kpa}$$

Ahora usando la Ecuación 6 se obtiene el factor de seguridad

$$Nf = \frac{Sy}{\sigma} = \frac{50 \text{ Mpa}}{4.93 \text{ Mpa}} = 10.14$$

6.4.3 Cálculo de los elementos verticales Columnas

Para el cálculo de las columnas de unión entre el subconjunto Y y los carros de movimiento en el eje X, se realiza a partir del cálculo para columnas de Euler el cual establece según las características físicas de diseño un diámetro o longitud de cara dependiendo la forma geométrica de la columna.

Para una figura cuadrada la Ecuación 7 de Euler para encontrar la medida mínima de la longitud de la cara (b) es:

$$b^4 = \frac{12 P_{cr} l^2}{\pi^2 CE} \quad (7)$$

Donde:

L: Longitud de la Columna.

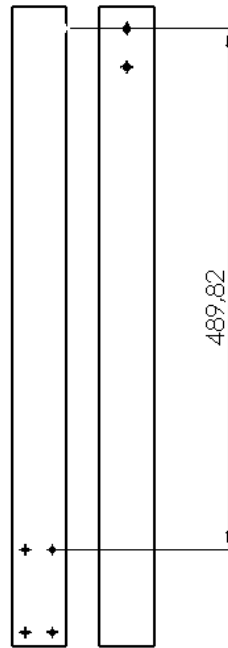
P_{cr}: Carga Sometida en la Columna.

C: Constante de Relación final de la columna de Euler.

E: Modulo de Elasticidad.

La longitud se obtiene de la Ilustración 28, que es la medida entre los centros de las uniones que soportarán la carga es decir 0.49m, C corresponde a la condición de empotrado-empotrado que es igual a 1.2 y E se obtiene del Anexo A, que corresponde para el aluminio 6063 a 69.5 Mpa y P_{cr} corresponde al mismo valor de Wt usado para el cálculo de la viga del eje X que corresponde a 58.97N.

Ilustración 28 Dimensiones Elementos verticales



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Entonces a partir de la Ecuación 7

$$b^4 = \frac{12 \times 58.97N \times 0.49^2m}{\pi^2 \times 1.2 \times 69.5Mpa} = 2.064 \times 10^{-7}m^4$$

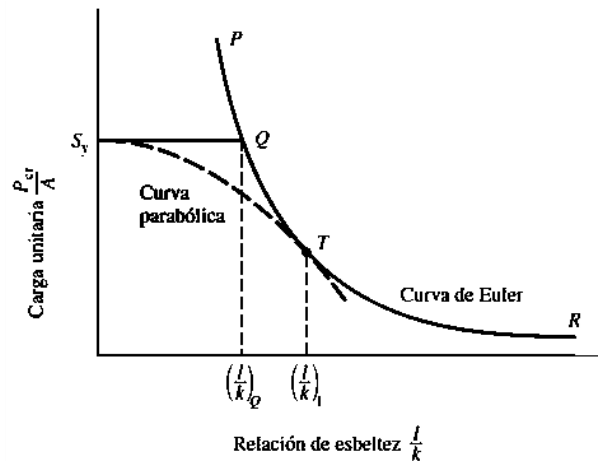
$$b = \sqrt[4]{b^4} = 0.021m$$

$$b = 21.3 \text{ mm}$$

Como se observa el valor mínimo de la cara sería de 21.3 mm lo que correspondería a un perfil comercial de 1 pulgada, pero se decide dar un factor de seguridad de por lo menos dos veces más para que la columna no quede diseñada a las condiciones mínimas de operación, por lo que se seleccionó un perfil cuadrado de 2 pulgadas.

Una vez seleccionado el perfil y para estar seguros de que realmente se trata de una Columna de Euler se compara la relación de la esbeltez de la columna λ , con la esbeltez mínima para el punto T λ_1 de la ilustración 29, el cual es el punto que recomienda para el diseño el libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley.

Ilustración 29 Curva de Euler



Fuente: Shigley pag 175

Se establece entonces que corresponde a una columna de Euler si λ es mayor a λ_1 , para encontrar estos valores se utilizan las Ecuaciones 8 y 9:

$$\lambda = \frac{l}{k} \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{2\pi^2 \times C \times E}{S_y}} \quad (9)$$

Donde:

l: longitud de la Viga.

k: Radio de Giro.

C: Constante de Relación final de la columna de Euler.

E: Modulo de Elasticidad.

Sy: Esfuerzo Fluencia del Aluminio.

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (10)$$

Donde:

I: Inercia del Perfil.

A: Área del Perfil. .

$$k = \sqrt{\frac{9.76 \times 10^{-8} m^4}{2.38 \times 10^{-4} m^2}}$$

$$k = 0.02 \text{ m}$$

Obtenido el valor de k se puede obtener el valor λ a partir de la Ecuación 8, para con esto poder saber si la columna corresponde a una de Euler o simplemente es un elemento sometido a compresión pura.

$$\lambda = \frac{0.49\text{ m}}{0.02\text{ m}} = 24.5$$

Se calcula ahora la esbeltez mínima λ_1 de la Ecuación 9

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{2\pi^2 \times 1.2 \times 69.5\text{ Mpa}}{50\text{ Mpa}}}$$

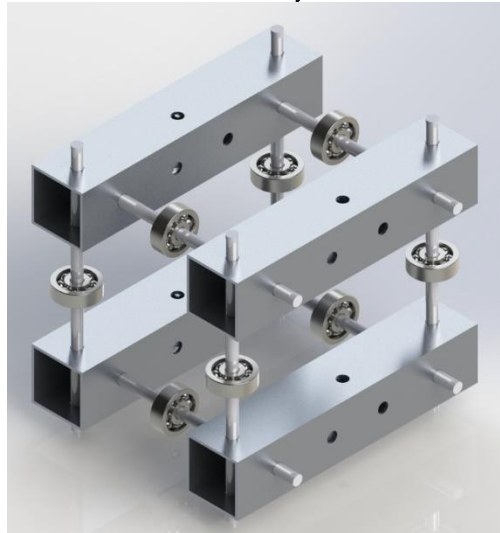
$$\lambda_1 = 5.7$$

Lo anterior indica que si se comporta como una columna de Euler por lo que se deja seleccionado garantizando un factor de seguridad de dos un perfil de aluminio cuadrado de 2 pulgadas.

6.4.4 Cálculo del perfil de los carros.

Los carros se fabricarán en perfiles cuadrados de aluminio con un sistema de tornillos, tuercas de seguridad y rodamientos (Ilustración 30). El posicionamiento de las tuercas permite ajustar los rodamientos a los perfiles sobre los que se deslizará, de tal forma el carro queda con el mínimo juego. Este diseño permitirá ajustar los carros a perfiles de distintos tamaños, como los perfiles seleccionados para el eje X y Y.

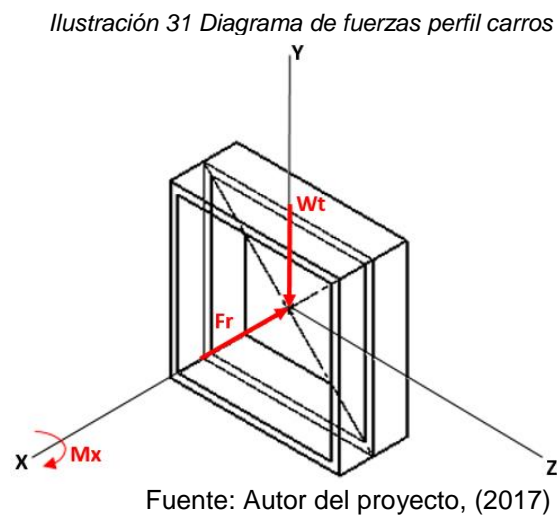
Ilustración 30 Conjunto Carro



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Como se mencionó en los cálculos para el eje X, el perfil cuadrado de aluminio con el que se fabricarán los carros es de 1 pulgada, a continuación se realizan los cálculos basados en esta geometría para encontrar los esfuerzos que soportará bajo las condiciones de trabajo a las que estará sometido.

Se procede a trasladar las fuerzas en la cara de acción de las mismas y realizar el diagrama de cuerpo fuerzas de la Ilustración 31.



Donde:

$$Wt = 58.97N$$

Fr corresponde a la fricción entre el rodamiento y el caucho duro que se instalará para reducir el desgaste entre las piezas.

$$Fr = Wt * \mu$$

Donde μ corresponde al valor del coeficiente de fricción entre el acero del rodamiento y el caucho. Tabla 6, que corresponde a 0.303

Tabla 6 Fricción de diferentes materiales con Acero

Materiales en Contacto		Coeficiente de Fricción Dinámico
Acero Forjado	Acero	0.019
Hierro Fundido	Acero	0.021
Caucho Duro	Acero	0.303
Poliuretano	Acero	0.030 - 0.057
Nylon	Acero	0.027
Resina	Acero	0.026

Fuente: [5]

Entonces:

$$Fr = 58.97 N * 0.303$$

$$Fr = 17.87 N$$

El momento M_x se genera al trasladar la fuerza W_t al centro de la geometría, entonces para un perfil de $\frac{1}{2}$ pulgada:

$$M_x = 58.97 \text{ N} * 12.7 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$M_x = 0.75 \text{ Nm}$$

Se procede a calcular los esfuerzos presentes, a los que será sometido dicho perfil.

$$\sigma_n = -\frac{V}{A} \pm \frac{M_x c}{I_x} \quad (11)$$

Donde:

V = Fuerza normal aplicada en la cara de estudio [Fr]

A = Área de aplicación de la fuerza.

M_x = Momento alrededor del eje

I_x = Momento de Inercia

c = Fibra externa

$$A = (25.4 \times 10^{-3} \text{ m})^2 - (23 \times 10^{-3} \text{ m})^2$$

$$A = 1.16 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I_x = \frac{25.4^4}{12} - \frac{23^4}{12}$$

$$I_x = 1.13 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\sigma_n = \frac{17.87 \text{ N}}{1.16 \times 10^{-4} \text{ m}^2} + \frac{0.75 \text{ Nm} * (12.7 \times 10^{-3} \text{ m})}{1.13 \times 10^{-8} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_n = 996.97 \text{ Kpa}$$

El Cortante se calcula a partir de la acción de la carga transversal y el tórsor que se presente, pero como en este caso no hay acción de ningún tórsor solo se calcula a partir de la fuerza transversal [W_t].

$$\tau_{xy} = \frac{3W_t}{2A} \quad (12)$$

$$\tau_{xy} = \frac{3(58.97 \text{ N})}{2(1.16 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}$$

$$\tau_{xy} = 762.54 \text{ Kpa}$$

Se calculan ahora los esfuerzos principales a partir de la Ecuación 5

$$\sigma_1 = \frac{996.97 \text{ Kpa}}{2} + \sqrt{\left(\frac{996.97 \text{ Kpa} - 0}{2}\right)^2 + 762.54 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{996.97 \text{ Kpa}}{2} - \sqrt{\left(\frac{996.97 \text{ Kpa} - 0}{2}\right)^2 + 762.54 \text{ Kpa}^2}$$

$$\sigma_1 = 1.4 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_2 = -412.53 \text{ Kpa}$$

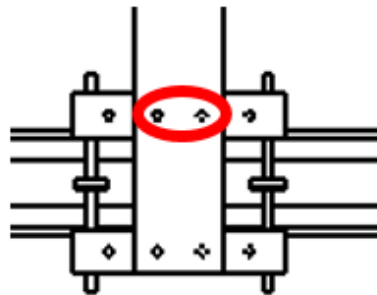
El factor de seguridad se obtiene de la Ecuación 6

$$Nf = \frac{Sy}{\sigma} = \frac{50 \text{ Mpa}}{1.4 \text{ Mpa}} = 35.71$$

Se observa que el perfil seleccionado será capaz de soportar los esfuerzos a los que será sometido, ahora se pasa a realizar el cálculo del diámetro mínimo de la varilla roscada con los que se sujetarán los carros con las columnas que unen el subconjunto del eje Y.

Como se observa en la Ilustración 32 la carga [Wt] estará realmente soportada en dos puntos, por lo que se analizará uno de ellos con la mitad de la carga para encontrar el diámetro mínimo de la varilla roscada para soportar la carga.

Ilustración 32 Vista lateral conjunto carro



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Según la norma ASTM A307-07b, especifica que los tornillos y pernos de sujeción de acero al carbono grado 2 que es el material en el que se fabrican las varillas roscadas, determina una resistencia a la tracción de S 60.000 psi, con este valor de resistencia, se puede hallar el diámetro mínimo para el tornillo a partir de la Ecuación 13

$$S = \frac{4 \frac{W_t}{2}}{3A} \quad (13)$$

$$A = \frac{4 \frac{W_t}{2}}{3S} = \frac{4 * 29.48N}{3 * 413.7 Mpa}$$

$$A = 9.5 \times 10^{-8} m^2$$

El área de un círculo está dado por la siguiente expresión:

$$A = \pi r^2$$

Despejando el radio:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{9.5 \times 10^{-8} m^2}{\pi}}$$

$$r = 1.7 \times 10^{-4} m$$

A partir del resultado anterior se sabe entonces que el diámetro mínimo necesario es de 0.34 mm, basado en este diámetro y conociendo que comercialmente el mínimo diámetro en varillas roscadas que se consigue es de 3/16 de pulgada, se establece este diámetro para todos los tornillos presentes en el proyecto.

Basados en el diámetro de las varillas roscadas se seleccionan los rodamientos que se ajusten al mismo, para evitar al máximo el juego entre los elementos, por tal razón se selecciona el rodamiento 635zz el cual tiene un diámetro interno de 5 mm dejando una diferencia de ajuste entre eje y rodamiento de 0.24 mm.

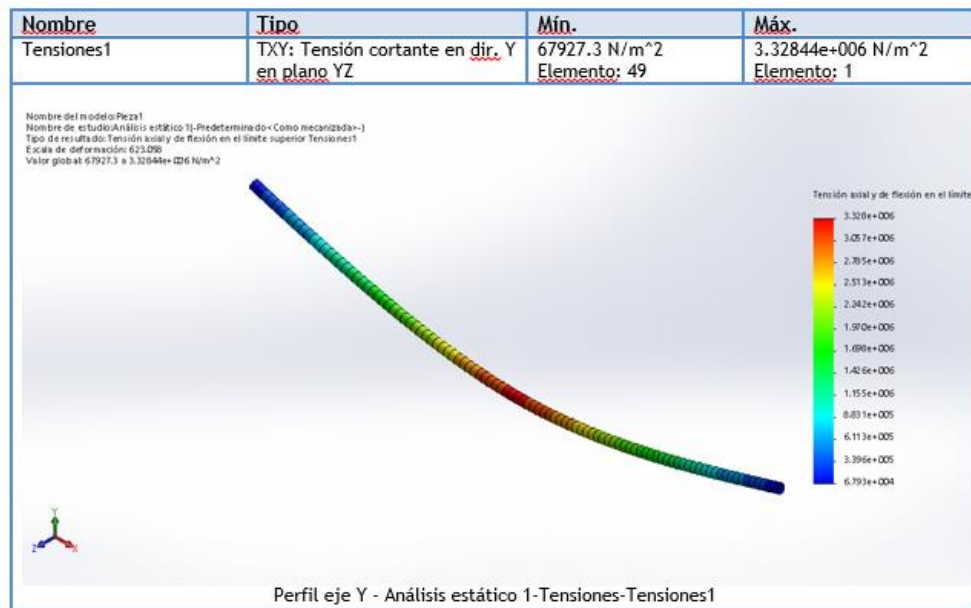
6.5 SIMULACIÓN CÁLCULOS ESTRUCTURALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la realización de un análisis estático ejecutado en el software de diseño SolidWorks mediante la herramienta de simulación. Cada una de las simulaciones se realizó con las condiciones de cargas y geometrías definidas en el apartado de cálculos estructurales, obteniendo el esfuerzo principal y el factor de seguridad.

6.5.1 Perfil eje Y

En la Ilustración 33 se observa que el resultado de la simulación para el esfuerzo dio un valor de 3.32 Mpa, al compararlo con el obtenido teóricamente (numeral 6.4.1) el cual dio 3.3 Mpa se obtiene un error de 0.6%.

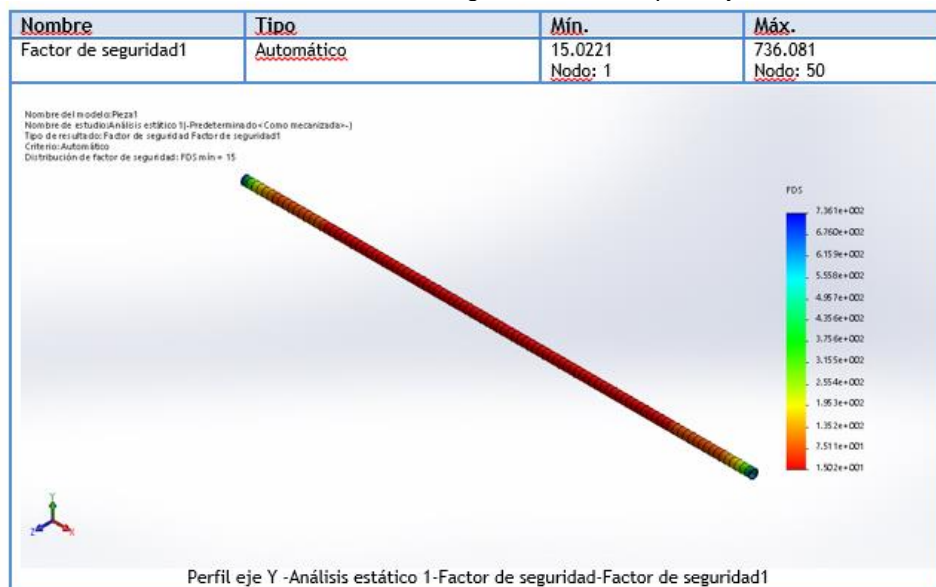
Ilustración 33 Esfuerzo simulado perfil eje Y



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

En la Ilustración 34 se observa la simulación para el factor de seguridad el cual arrojó un resultado de 15.02, frente al teórico con un valor de 15.15 lo que da un error de 0.85%, con la comparación de los valores obtenidos tanto en simulación como en análisis teórico, se puede asegurar que hay congruencia por ende el diseño propuesto es correcto.

Ilustración 34 Factor de seguridad simulado perfil eje Y

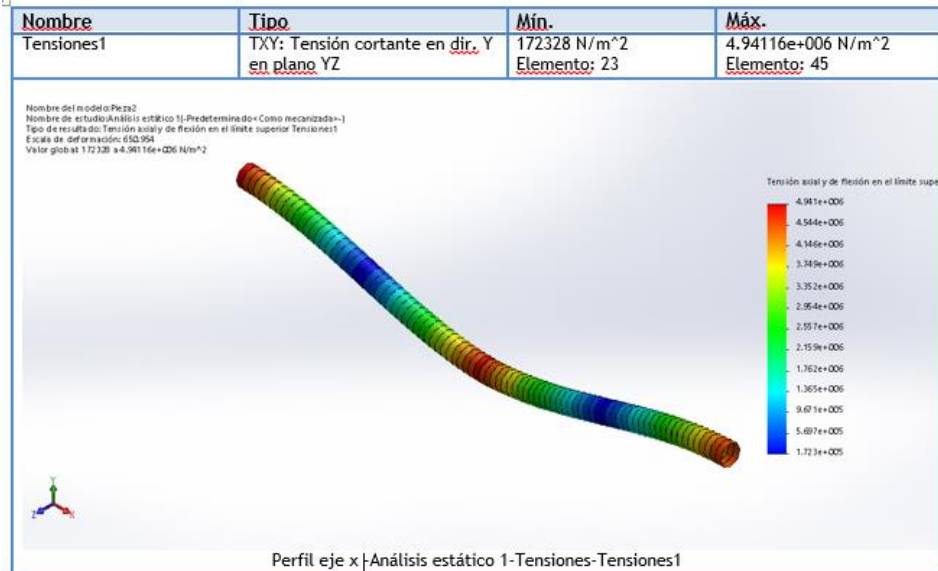


Fuente: Autor del proyecto, (2017)

6.5.2 Perfil eje X

En la Ilustración 35 se observa que el resultado de la simulación para el esfuerzo dio un valor de 4.94 Mpa, al compararlo con el obtenido teóricamente (numeral 6.4.1) el cual dio 4.93 Mpa se obtiene un error de 0.2%.

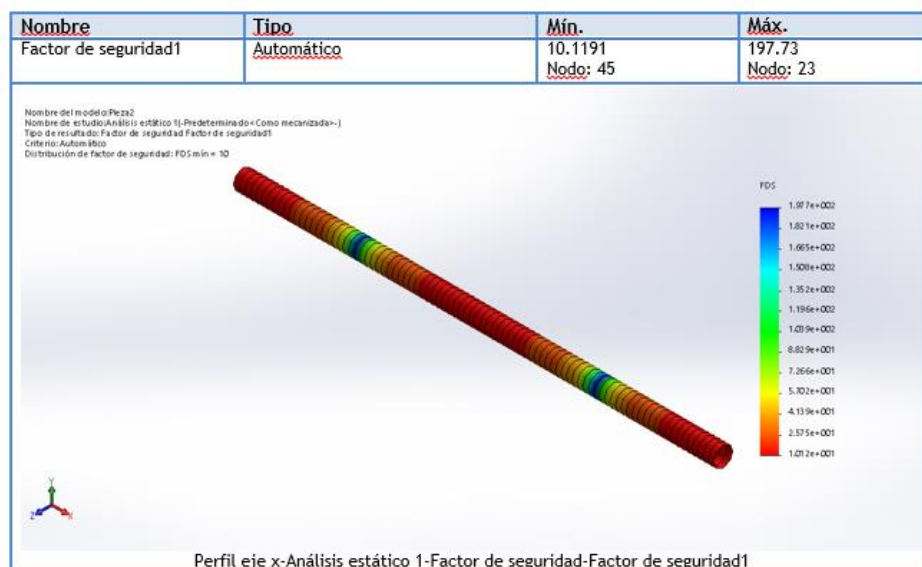
Ilustración 35 Esfuerzo simulado perfil eje X



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

En la Ilustración 36 se observa la simulación para el factor de seguridad el cual arroja un resultado de 10.11, frente al teórico con un valor de 10.14 lo que da un error de 0.29%, la diferencia de los valores simulados con los teóricos no es significativa lo que indica que los cálculos estructurales se realizaron correctamente.

Ilustración 36 Factor de seguridad simulado perfil eje X

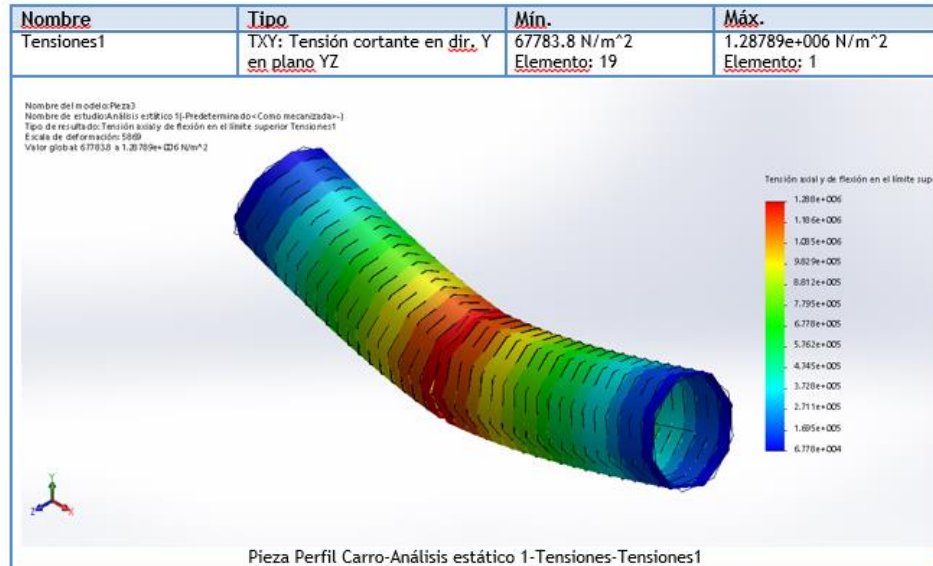


Fuente: Autor del proyecto, (2017)

6.5.3 Perfil carro

En la Ilustración 37 se observa que el resultado de la simulación para el esfuerzo dio un valor de 1.28 Mpa, al compararlo con el obtenido teóricamente (numeral 6.4.1) el cual dio 1.4 Mpa se obtiene un error de 8%.

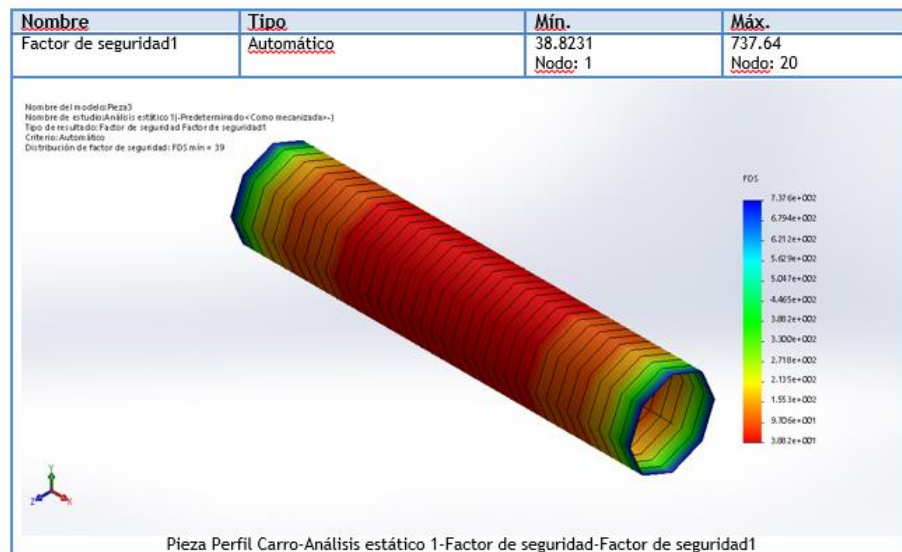
Ilustración 37 Esfuerzo simulado perfil carro



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

En la Ilustración 38 se observa la simulación para el factor de seguridad el cual arroja un resultado de 38.82, frente al teórico con un valor de 35.71 lo que da un error de 8%, la diferencia de los valores simulados con los teóricos no es significativa lo que indica que los cálculos estructurales se realizaron correctamente.

Ilustración 38 Factor de seguridad simulado perfil carro

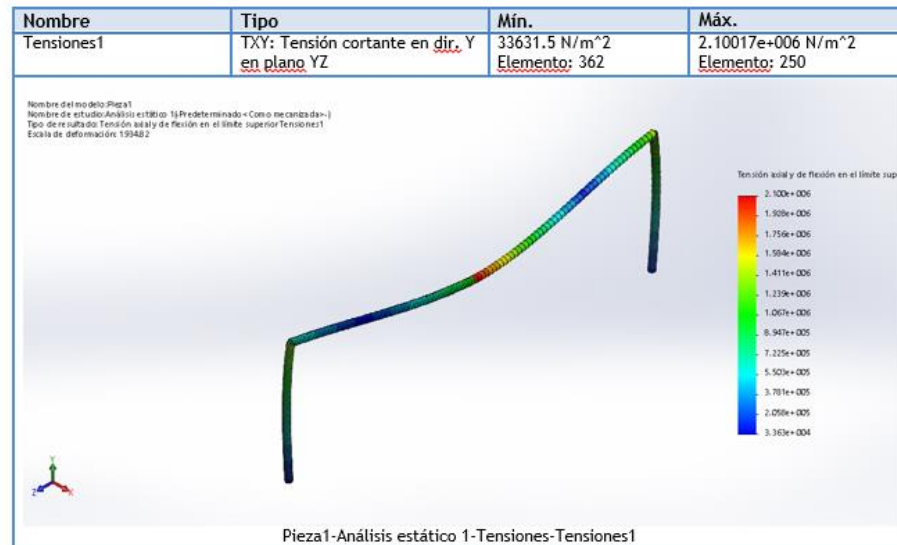


Fuente: Autor del proyecto, (2017)

6.5.4 Simulación Arco compuesto Eje Y y columnas

En el siguiente apartado se deja como complemento de las simulaciones, una que corresponde a la deflexión, esfuerzo y factor de seguridad del arco compuesto por el ensamblaje del Subconjunto eje Y y las columnas, ya que este ensamblaje es crítico en el momento de llegar a mecanizar. En la Ilustración 39 se observa que el resultado de la simulación para el esfuerzo dio un valor de 2.1 Mpa, lo que demuestra que al agregar las dos columnas el esfuerzo sobre la viga del eje Y baja, asegurando su integridad.

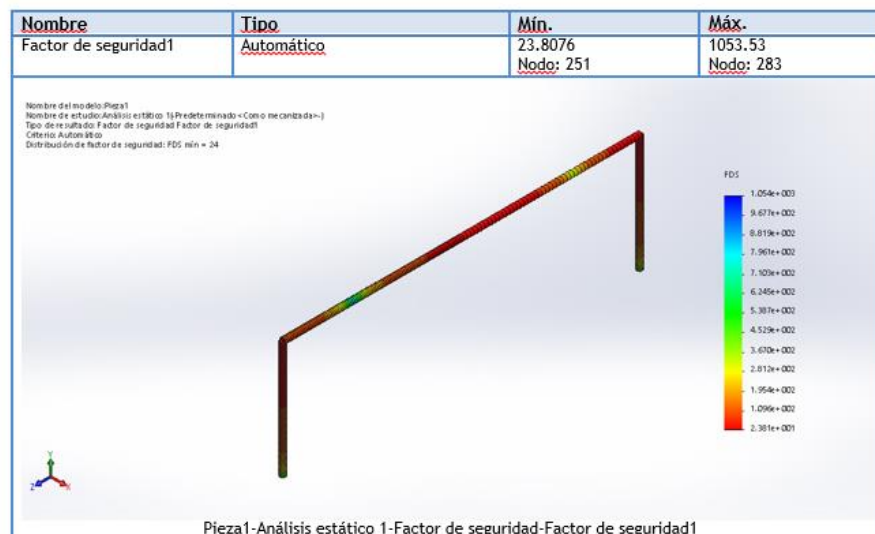
Ilustración 39 Esfuerzo simulado Arco



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

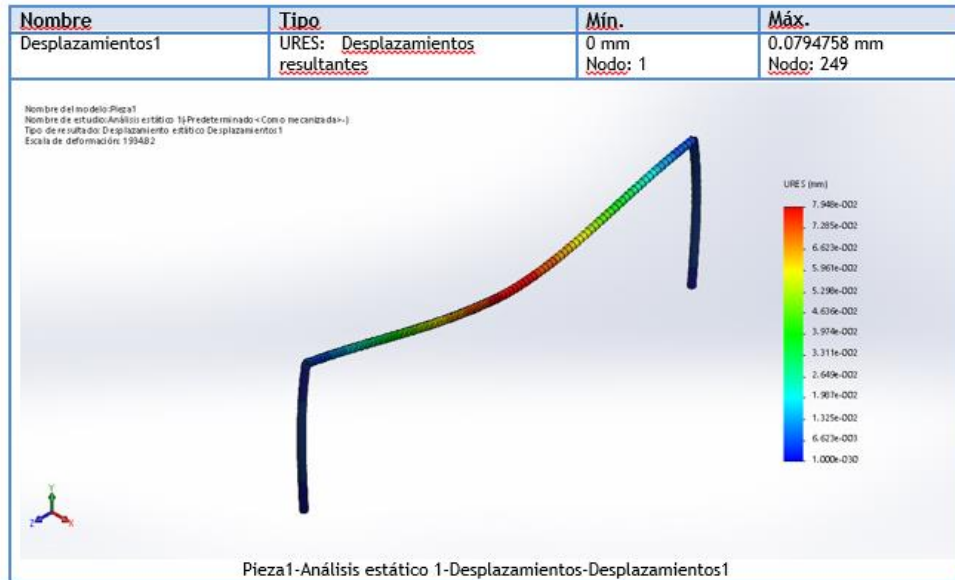
En la Ilustración 40 se observa que el factor de seguridad en la mitad de la viga del eje Y aumento de 15.02 a 23.8, asegurando un aumento en la confiabilidad del perfil seleccionado.

Ilustración 40 Factor de Seguridad Simulado Arco



Por ultimo en la ilustración 41 se observa la deflexión máxima simulada la cual dio un valor de 0,079 mm, valor que es despreciable asegurando así que no se verá afectada la realización de piezas al momento de mecanizar.

Ilustración 41 Deflexión simulada Arco



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

6.6 CÁLCULO DE ELEMENTOS DE POTENCIA

6.6.1 Cálculo del posible motor para corte de material.

Cuando se desea calcular la potencia de una fresadora, esta se hace evidente mediante la relación de la cantidad de viruta que esta misma puede desprender. Al momento de querer aprovechar al máximo la potencia de dicha maquina se deberá tomar como base de referencia la velocidad de avance.

Para encontrar la potencia nominal de la maquina esta se calcula mediante el avance de corte y el arranque de viruta admisible de la herramienta sobre la superficie a tratar, entonces de la Tabla 7 se obtiene el valor de S' que corresponde con la velocidad de avance de un material ligero sometido a un fresado frontal de diámetro hasta 70 mm y un desbaste de 5 mm, así entonces el valor de $S' = 250$ mm/min

Tabla 7 Velocidad y Avance de la Herramienta

Material de trabajo		Fresa cilíndrica b=100 mm		Fresa frontal b=70 mm		Fresa de disco b=20 mm		Fresa de vástago b=25 mm		Platos de cuchillas b=180 mm		Sierras b=2.5 mm
Acabado Profundidad		desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste
		a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=10
Acero sin alear hasta 65 kg/mm ²	vc	17	22	17	22	18	22	17	22	20	30	45
	S'	100	60	100	70	100	40	50	120	20	50	50
Acero aleado hasta 75 kg/mm ²	vc	14	18	14	18	14	18	15	19	16	23	35
	S'	80	50	90	55	80	30	40	100	65	40	40
Acero aleado hasta 100 kg/mm ²	vc	10	14	10	14	12	14	13	17	14	18	25
	S'	50	36	55	42	50	25	20	65	36	30	30
Fundición gris	vc	12	18	12	18	14	18	15	19	16	24	35
	S'	120	60	140	70	120	40	60	120	100	90	50
Latón	vc	35	35	36	55	36	55	35	55	50	60	350
	S'	70	50	190	150	150	75	80	120	200	120	200
Materiales ligeros	vc	200	250	200	250	200	250	160	180	250	300	320
	S'	200	100	250	110	200	100	90	120	250	90	180

Fuente:[39]

Donde:

a= 5 mm equivale a desbastado

a = 0.5 mm equivale a afinado

b = ancho de la fresa en mm

Vc = Velocidad de corte en m/min

S'= Velocidad de avance en mm/min

A partir de la Ecuación 14, se puede determinar la cantidad máxima de viruta admisible [V].

$$V = \frac{a * b * S'}{1000 \frac{mm^3}{cm^3}} \quad (14)$$

Reemplazando valores se tendría que:

$$V = \frac{5 \text{ mm} * 10 \text{ mm} * 250 \text{ mm/min}}{1000 \frac{mm^3}{cm^3}}$$

$$V = 12.5 \frac{cm^3}{min}$$

Una vez conocido el valor de la cantidad de viruta admisible, se despeja de la Ecuación 15 el valor de N que sería la potencia del motor en Kw.

$$V = V' * N \quad (15)$$

$$N = \frac{V}{V'}$$

El valor de V' se obtiene de la Tabla 8, que corresponde a la Viruta Admisible en una Fresadora frontal.

Tabla 8 Viruta Admisible

Tipo de fresa	Acero 35-60 kg/mm ²	Acero 60-80 kg/mm ²	Acero >80 kg/mm ²	Fundición gris	Latón y bronce rojo	Materiales ligeros
Fresa cilíndrica	12	10	8	22	30	60
Fresa frontal	15	12	10	28	40	75

Fuente: [39]

Entonces el valor de V' para una fresa Frontal y para un Material Ligero como lo es la espuma de poliuretano es. $V' = 75 \text{ cm}^3 / \text{kw} \cdot \text{min}$.

Volviendo al despeje de la potencia N a partir de la Ecuación 15, se obtiene:

$$N = \frac{\frac{12.5 \text{ cm}^3}{\text{min}}}{\frac{75 \text{ cm}^3}{\text{kw}} * \text{min}}$$

$$N = 0.166 \text{ kw}$$

Una vez obtenido el valor de la potencia nominal del motor $[N]$, se procede a calcular el valor de las rpm $[n]$ mínimas necesarias en el mismo, para esto se usa la Ecuación 16:

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (16)$$

En donde $[d]$ = diámetro de la herramienta y $[n]$ =revoluciones del motor en $[RPM]$, entonces despejando $[n]$ de la ecuación anterior y reemplazando valores:

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * d}$$

$$n = \frac{200 \frac{\text{m}}{\text{min}} * 1000}{\pi * 10 \text{ mm}}$$

$$n = 6366 \text{ rpm}$$

Con estos valores se puede realizar también el cálculo de la fuerza de corte, el cual es un muy importante parámetro a tener en cuenta para evitar roturas y deformaciones en la herramienta y en la pieza, esta fuerza está en función del avance de fresado, la velocidad de corte y la maquinabilidad del material, estos valores se ven relacionado en la Ecuación 17:

$$P_c = \frac{a_p * a_e * v_f * k_c}{60 * 102 * 9.81} \quad (17)$$

De la anterior ecuación se despeja K_c que es la fuerza específica de corte:

$$K_c = \frac{60 * 102 * 9.81 * P_c}{a_p * a_e * v_f}$$

Donde:

P_c : Potencia de Corte.

a_p : Profundidad axial de la herramienta.

a_e : Profundidad Radial de la herramienta.

V_f : Tasa de avance de la herramienta.

La tasa de Avance se calcula a partir de la Ecuación 18:

$$V_f = n * f_z * z \quad (18)$$

Donde:

F_z : Avance por diente de la Fresa.

Z : Numero de dientes de la herramienta.

n : Revoluciones del motor.

El valor de F_z se obtiene de la Tabla 9, para una fresa de 10 mm que equivale a 0.033 mm/diente, z es 4 dientes/rev y n es el valor de revoluciones del motor calculado anteriormente.

$$V_f = 6366 \text{ rpm} * \frac{0.033 \text{ mm}}{\text{diente}} * 4 \frac{\text{dientes}}{\text{rev}}$$






$$V_f = 814.8 \text{ mm/min}$$

Los valores de a_p y a_e corresponden respectivamente a 45 mm y 10 mm, el primero debido a que se desea obtener el valor máximo de la fuerza el cual ocurre cuando se mecaniza con el valor máximo de corte de la herramienta de corte, que para el caso de la fresa de 10 mm corresponde a 45 mm obtenido de la ilustración 6, a_e es 10 mm por la misma razón de que se desea usar el máximo de la herramienta y el diámetro de la misma es de 10 mm, del mismo modo el valor de P_c corresponde a la potencia calculada anteriormente de 0.166Kw, entonces el valor de K_c a partir de la Ecuación 17 sería:

$$K_c = \frac{60 * 102 * 9.81 * 0.166 \text{ Kw}}{45 \text{ mm} * 10 \text{ mm} * 814.8 \text{ mm/min}}$$

$$K_c = 0.027 \text{ N/mm}^2$$

Tabla 9 Características Fresa Desbaste

\varnothing js14 D_c	19 2520 HSS-PM	19 2541 HSS-PM TiAlN	 L_s	 L_{tot}	 h_6	 19 2520	19 2541	 f_z
mm			mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	XXX	XXX	45	95	10	0,3	0,5	0,033
12	XXX	XXX	53	110	12	0,5	0,7	0,045
14	XXX	XXX	53	110	12	0,5	0,7	0,045
16	XXX	XXX	63	123	16	0,5	0,7	0,050
18	XXX	XXX	63	123	16	0,5	0,7	0,050
20	XXX	XXX	75	141	20	0,5	1,0	0,060
22	XXX	—	75	141	20	0,5	—	0,060
25	XXX	XXX	90	166	25	0,5	1,0	0,060

Fuente: [1]

Para obtener el valor de la fuerza a la que se somete la herramienta se multiplica el valor de k_c por el área lateral de contacto de la herramienta.

$$A_{lat} = 2 * \pi * r * h$$

Para establecer la fuerza de corte máxima se tomará como valor de h en la anterior ecuación toda la longitud de corte que dispone la herramienta es decir 45 mm y se utilizará la mitad del área lateral, ya que es esta la que realmente está en contacto con el material.

$$A_{lat} = \pi * 5mm * 45 mm$$

$$A_{lat} = 706.8 mm^2$$

Entonces la fuerza de corte en [N] sería:

$$F_c = K_c * A_{lat}$$

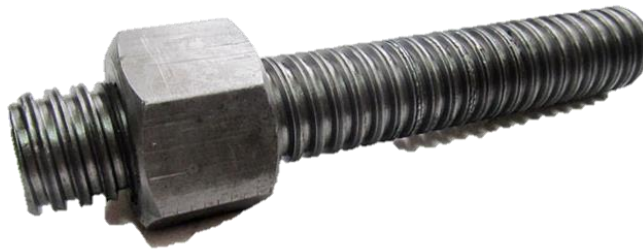
$$F_c = \frac{0.027N}{mm^2} * 706.8 mm^2$$

$$F_c = 19 N$$

6.6.2 Cálculo de Tornillo de potencia

Los tornillo que se van a utilizar en este proyecto son 4, cada uno correspondiente a cada eje del robot a excepción del eje X que llevará dos tornillos con el fin de asegurar el correcto desplazamiento del mismo, los tornillos para transmitir potencia como es este caso deben ser de rosca cuadrada (Ilustración 42) razón por la que se utilizan varillas de rosca cuadrada conseguidas comercialmente en longitudes de 3 metros y de diámetros desde media pulgada en adelante, las cuales se cortan a la medida deseada.

Ilustración 42 Tornillo de Potencia



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Se realizarán los cálculos para el tornillo que impulsará el eje X, ya que este es el que soporta más fuerza debido al subconjunto del eje Y, y del subconjunto de eje Z.

A continuación se presentan los cálculos sugeridos por el libro “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley” para tornillos de potencia como es el caso, en ese orden de ideas el primer cálculo aplicable sería el mirar el torque necesario para que el tornillo mueva la carga es decir el peso al que está sometido, para esto se utiliza la Ecuación 18:

$$Tr = \frac{F * d_m}{2} \left(\frac{l + \pi * f * d_m}{\pi * d_m - f * l} \right) \quad (18)$$

Donde:

F= fuerza sobre el tornillo

dm= Diámetro de paso

f = fricción

l= avance

El diámetro de paso se obtiene restándole al diámetro de la varilla la mitad del paso de la misma, entonces

$$dm = d - \frac{p}{2} = 12.7 \text{ mm} - \frac{5.08}{2} = \mathbf{10.16 \text{ mm}}$$

El avance (l), corresponde a el mismo paso es decir 5.08 milímetros por vuelta.

El valor de f se obtiene de la tabla 8 – 5 del libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Este valor corresponde a f= 0.17.

El valor de la Fuerza sobre el tornillo será calculado para cuando la maquina se está moviendo, cortando material, pues es en este momento donde se supone que el tornillo ejerce mayor fuerza debido a la resistencia de corte del material, así pues la fuerza será la sumatoria de la fuerzas debida a los pesos, la fricción

de los carros y la fuerza de corte del material calculada anteriormente, de modo entonces que el valor de la fuerza es:

$$F = F_c + W_t + F_r$$

Donde:

F_c = Fuerza de corte del material.

W_t = Peso de los elementos estructurales.

F_f = Fuerza de fricción de los carros.

Entonces el valor de la fuerza F es:

$$F = 19 \text{ N} + 58.97 \text{ N} + 17.87 \text{ N}$$

$$F = 95.84 \text{ N}$$

De modo que el valor del torque necesario para mover la carga por el tornillo y la tuerca es:

$$Tr = \frac{0.09584 * 10.16}{2} \left(\frac{5.08 + \pi(0.17)(10.16)}{\pi(10.16) - 0.17(5.08)} \right)$$

$$Tr = 0.16 \text{ N} * m$$

Ahora se pasa a calcular el esfuerzo cortante, debido al Tr sobre el exterior del cuerpo de tornillo, esto se hace mediante la Ecuación 19:

$$\tau = \frac{16 Tr}{\pi d_r^3} \quad (19)$$

Donde:

Tr = Torque requerido

d_r = Diámetro menor.

$$d_r = d - p = 12.7 \text{ mm} - 5.08 = 7.62 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{16 (0.16) 10^3}{\pi (7.62^3)} = 1.84 \text{ MPa}$$

El esfuerzo axial normal σ es:

$$\sigma = -\frac{4F}{\pi d_r^2} = -\frac{4(0.09584) 10^3}{\pi (7.62^2)} = -2.1 \text{ MPa}$$

El esfuerzo flexionante en la raíz de la rosca σ_b se calcula remplazando la F por $0.38F$, esto debido a que en experimentos realizados sobre este tipo de tornillos

se llegó a la conclusión de que la primera rosca soporta 0.38F, la segunda 0.25, la tercera 0.18 y la séptima prácticamente está libre de carga, así que para los cálculos se toma la primera rosca y así se obtendrá el nivel máximo de esfuerzo en la combinación rosca- tuerca, entonces:

$$\sigma_b = \frac{6(0.38F)}{\pi d_r p} = \frac{6(0.38)(0.09584)10^3}{\pi(7.62)(5.08)} = 1.8MPa$$

Se Obtiene entonces que:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 1.8 MPa & \tau_{xy} &= 0 \\ \sigma_y &= 0 & \tau_{yz} &= 1.84 MPa \\ \sigma_z &= -2.1 MPa & \tau_{zx} &= 0\end{aligned}$$

Para saber si la varilla seleccionada cumplirá con las condiciones de carga establecidas se utilizará la teoría de falla Von Misses, luego se despejará el valor de Nf el factor de seguridad a partir del valor de esfuerzo equivalente de Von Misses y el esfuerzo de fluencia del material del cual esta echa la varilla roscada.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_x\sigma_z - \sigma_y\sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

$$\sigma' = \sqrt{1.8^2 + (-2.1^2) - (1.8 * -2.1) + (3 * 1.84^2)}$$

$$\sigma' = 3.57 MPa$$

Ya que la varilla seleccionada esta echa de un acero ASI – SAE 1020 se puede encontrar en tablas que su esfuerzo de fluencia Sy tiene un valor de 205 MPa, entonces el factor de seguridad para el tornillo es:

$$Nf = \frac{Sy}{\sigma'} = \frac{205 Mpa}{3.57Mpa} = 57.42$$

Como los valores de factores de seguridad garantizan que la varilla roscada del eje X que es la más crítica logrará operar sin fallar, se omiten los cálculos de las varillas de los ejes Y y Z.

6.7 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN ELEMENTOS DE SENSORES Y ACTUADORES.

6.7.1 Selección del motor pasó a paso

Para la selección del motor a pasos se tiene en cuenta el cálculo obtenido en el apartado 6.6.2 correspondiente a el torque requerido por el tornillo para mover la carga a la cual está sometido, este torque equivale a 0.16 Nm (16Ncm), por lo que se pasa a buscar cual motor paso a paso cumple con esta condición de torque mínimo.

Siguiendo el requerimiento número 1 del cliente según la matriz QFD del apartado 6.2.1, el cual es bajo consumo de energía, se seleccionó el motor a pasos nema 17 modelo 17HS4401 Ilustración 43 , el cual según el Anexo B, es capaz de entregar un torque de 0,4 Nm (40 Ncm) consumiendo 1.8 A, cumpliendo con las condiciones anteriormente mencionadas.

Ilustración 43 Motor Nema 17



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Se procede entonces a calcular el Factor de seguridad para el motor a partir del torque mínimo necesario y el entregado por el motor.

$$Nf = \frac{T_{motor}}{Tr} = \frac{0.4 Nm}{0.16 Nm} = 2.5$$

Como se puede observar este motor solo estaría utilizando un cuarenta por ciento de su capacidad nominal. Gracias al modo de funcionamiento de este tipo de motor, se puede diseñar el control punto a punto, sin necesidad de circuitos de realimentación y sin otro sensor, ahorrando con esto energía al no usar más elementos activos.

6.7.2 Micro controlador

Como dispositivo controlador para la robot cartesiano se utilizó un Arduino Mega 2560 (Ilustración 44), el cual es desarrollado por la empresa Arduino y tiene licencia de uso libre. Este dispositivo consta de las siguientes partes:

- 54 pines de entradas y salidas digitales (15 PWM).
- 16 entradas análogas.
- 4 puertos seriales.
- 1 oscilador 16 MHz.
- 1 Conector USB.
- 1 conector de potencia.

Ilustración 44 Arduino Mega 2560



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

El Micro controlador Arduino Mega 2560 recibe la señal de salida deseada desde el computador a través de un cable USB, utilizando comunicación serial, una vez recibe esta señal la procesa usando el código del control punto a punto cargado previamente a la tarjeta. Se envía la señal de control para el movimiento de los motores y se recibe la señal de los finales de carrera, los puertos de entrada y salida son configurados en el código del software Arduino. Se seleccionó el Arduino Mega porque este posee más entradas digitales que un Arduino UNO que son los más usados, además el Arduino Mega permite usar 6 pines para interrupciones los cuales eran necesarios para poder implementar la rutina de Home y la detención de la maquina si se llega a estrellar en uno de los finales físicos de la misma.

6.7.3 Sensor de finales de carrera

Es importante la selección de este tipo de sensor en el Robot, para que el mismo pueda saber cuáles son sus límites y así evitar que la maquina sufra daños, de igual forma es necesario a la hora de implementar el control punto a punto ya que con este sensor se podrá regresar cada uno de los ejes a una posición cero que se establezca.

Se seleccionó el final de carrera que se muestra en la Ilustración 45, ya que es el que más se encuentra comercialmente en los distribuidores, y por su fácil instalación. Al igual al conectarse directamente al Arduino no se necesita que el sensor soporte más de los 5v que entrega el microcontrolador por lo que este sensor es el ideal.

Ilustración 45 Final de Carrera



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

6.7.4 Driver de Potencia del motor

Para poder controlar el motor seleccionado se hace necesario la implementación de un driver que permita dependiendo las señales digitales del micro controlador, el paso de la corriente por cada una de las bobinas del motor.

Este driver permite manejar los altos voltajes e intensidades que se requiere para el movimiento de los motores, y proporcionan protecciones para evitar que la electrónica pueda resultar dañada.

De igual forma facilitan el control del motor ya que únicamente requieren de dos salidas digitales, una correspondiente a el sentido de giro y otra para comunicar la cantidad de pasos que se quiere que avance el motor.

El driver seleccionado es el Pololu A4988 (Ilustración 46), este es un puente H constituidos por transistores MOSFET los cuales dependiendo de la señal digital recibida abren el paso de la corriente.

Ilustración 46 Pololu A4988



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

El pololu A4988 consiste en una placa con dos filas de 8 pines a cada lado, por un lado tiene los pines para controlar la parte digital por el otro la parte dedicada a la corriente del motor. Para conocer más a fondo sobre este driver se puede consultar el datasheet en el Anexo C.

6.7.5 Fuente De Alimentación

Se seleccionó una fuente ATX que cumple con los requerimientos de energía de 12V y 6A para el movimiento de los motores paso a paso. Esta fuente además cumple con otro requerimiento del QFD el cual es lograr un bajo costo en la construcción del robot, ya que las demás fuentes tienen un precio más elevado comparado con esta, y ya que no es necesario más características físicas esta fuente es la idónea para alimentar todo el Robot

Ilustración 47 Fuente alimentación ATX



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

6.7.6 Caracterización Movimiento

Una vez seleccionado el motor y conectado mediante un acople flexible a la varilla roscada se procede a caracterizar el movimiento de los carros. Se aplicó una cantidad determinada de pulsos y se midió el desplazamiento del carro, esto para calcular la ganancia de transmisión en una escala de pasos por unidad de longitud y así determinar la cantidad de pasos necesarios para cumplir con la medida ingresada en la interfaz gráfica del control

Así entonces se le aplicaron 200 pasos al motor y con un comparador de caratula se mide el desplazamiento el cual corresponde a 5.08 mm, entonces:

$$pulsos/cm = \frac{200}{5.08} \times 10$$

$$pulsos/cm = 393.7$$

Obtenido este valor se sabe entonces que para que el motor logre hacer avanzar el carro 1 cm se debe mover 393.7 pasos, este valor es el mismo para el eje Y y Z, debido a que en los 3 ejes se utilizó la misma varilla roscada y el mismo motor.

Posteriormente se caracterizó el valor del Delay usado en la rutina de Arduino para obtener 3 velocidades posibles de movimiento del robot, partiendo desde la velocidad estimada para el corte del material según la Tabla 7 que corresponde a 200mm/min, así entonces se inició con un valor de delay aleatorio de 1000 y se midió el tiempo en que se demoró en recorrer 10 cm el cual fue de 8 segundos. Se calculó el valor del delay necesario para garantizar la velocidad mínima de corte del material y se establecieron dos velocidades un poco más rápidas y así garantizar la versatilidad de velocidades que dispone el robot, el resultado se presenta en la Tabla 9.

Tabla 10 Velocidades de Avance Robot Cartesiano

DELAY	VELOCIDAD mm/seg
900	13.8
1625	7.7
4000	3.3

Fuente: Autor del proyecto, (2017)

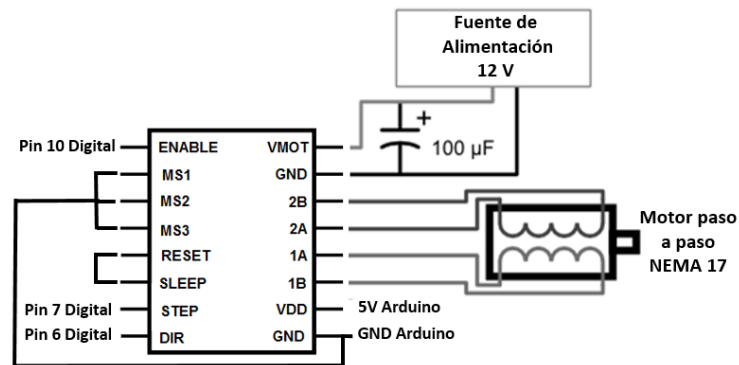
6.8 CIRCUITOS ELÉCTRICOS

6.8.1 Drivers

En la Ilustración 48 se observa el circuito eléctrico del driver pololu A4988 conectado a un Arduino Mega 2560 como microcontrolador.

El esquema eléctrico corresponde para un solo driver, el cual se replicó para los cuatro motores, conectados al Arduino tal y como se menciona en la Tabla 10.

Ilustración 48 Circuito eléctrico drivers A4988



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Tabla 11 Pines Digitales a los que van conectados los drivers de los Motores

Motor paso a paso	ENABLE	STEP	DIR
Motor X1	Pin 10	Pin 5	Pin 4
Motor X2	Pin 10	Pin 5	Pin 4
Motor Y	Pin 10	Pin 7	Pin 6
Motor Z	Pin 10	Pin 9	Pin 8

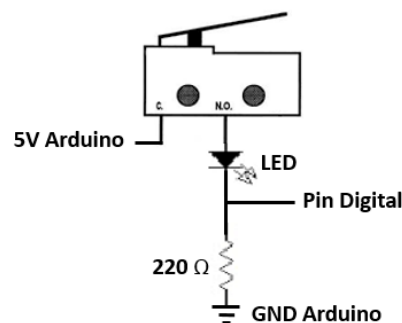
Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Se usaron entonces por cada driver 3 salidas digitales correspondientes a STEP para controlar el número de pasos que se requiere avance el motor, DIR el cual establece una dirección de giro y el pin digital ENABLE, que permite apagar la alimentación del motor para que cuando no se estén moviendo se reduzca el consumo de energía y se eviten daños en el motor y la electrónica.

6.8.2 Finales de Carrera

En la Ilustración 49 se observa el diagrama eléctrico del sensor final de carrera que se usa para establecer en cualquier momento una posición de Home del robot y de igual forma establecer el límite final a el que cada eje puede llegar.

Ilustración 49 Circuito eléctrico finales de carrera



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

En cada uno de los ejes se establece un pin digital del microcontrolador desde el que se recibe la señal digital tal y como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 12 Pines digitales finales de carrera de Home e Interrupción

Final de carrera	Pin Digital
FC X1- Home	Pin 26
FC X2- Home	Pin 26
FC Y- Home	Pin 22
FC Z- Home	Pin 24
FC X1-Interrupción	Pin 2
FC X2-Interrupción	Pin 2
FC Y-Interrupción	Pin 3
FC Z-Interrupción	Pin 18

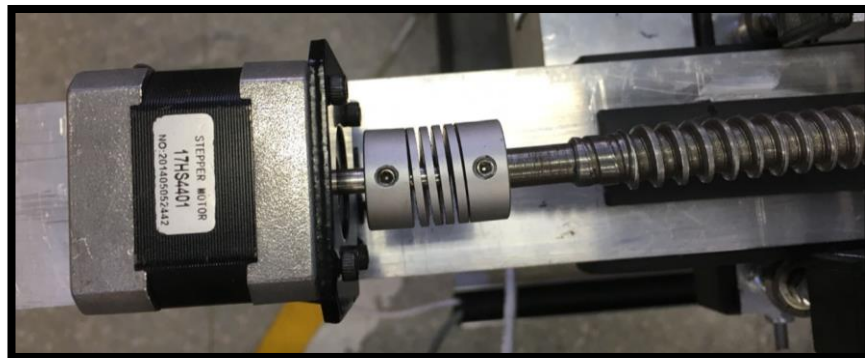
Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Los pines de interrupción se usaron para interrumpir la rutina de control y resetear el programa volviendo los ejes a home, esto pasa cada vez que el estado del sensor pasa de LOW a HIGH, lo cual se acciona cuando los carros llegan al extremo de los ejes, todo esto se hace con el fin de evitar choques que comprometan la seguridad de la máquina y el operario.

6.9 CONSTRUCCIÓN ROBOT CARTESIANO

A continuación se muestran las ilustraciones del robot cartesiano ya construida.

Ilustración 50 Acople Motor-Tornillo

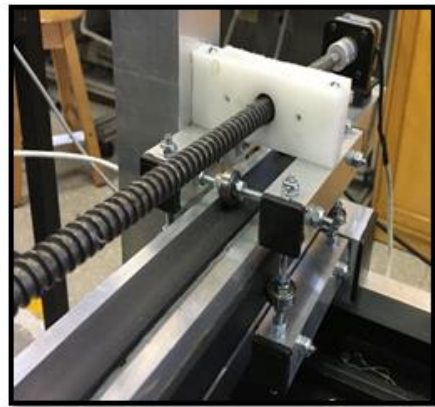


Fuente: Autor del proyecto, (2017)

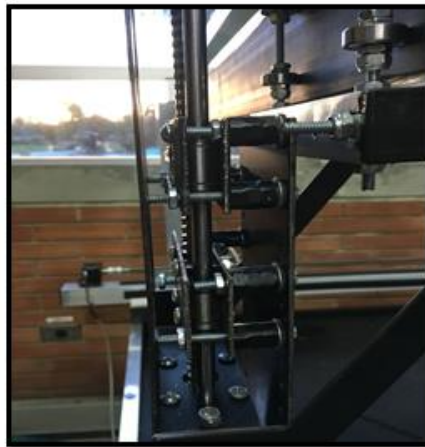
Ilustración 51 Carros a) Carro eje Y b) Carro eje X c) Carro eje Z



a)



b)



c)

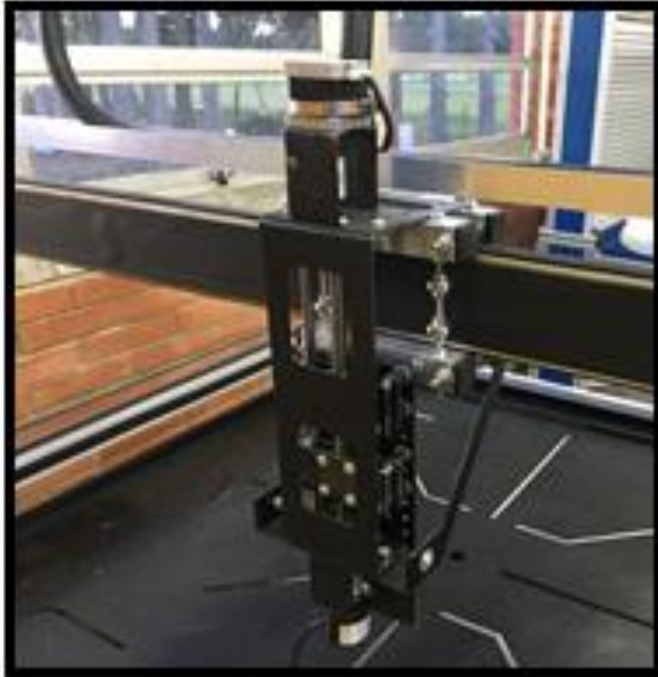
Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Ilustración 52 Eje Y



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Ilustración 53 Conjunto eje Z



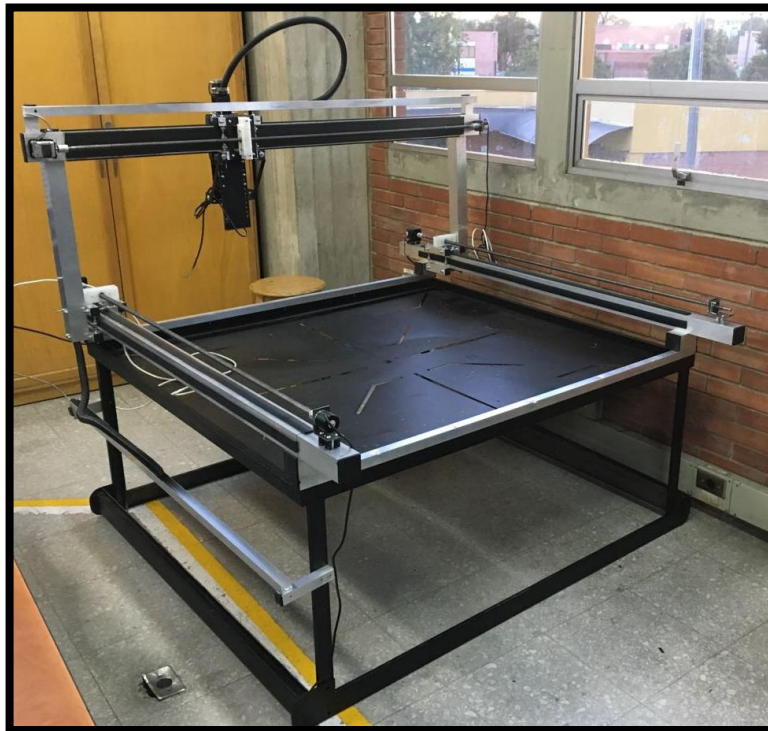
Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Ilustración 54 Final de Carrera



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Ilustración 55 Robot cartesiano construido



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

Ilustración 56 Robot cartesiano construida



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

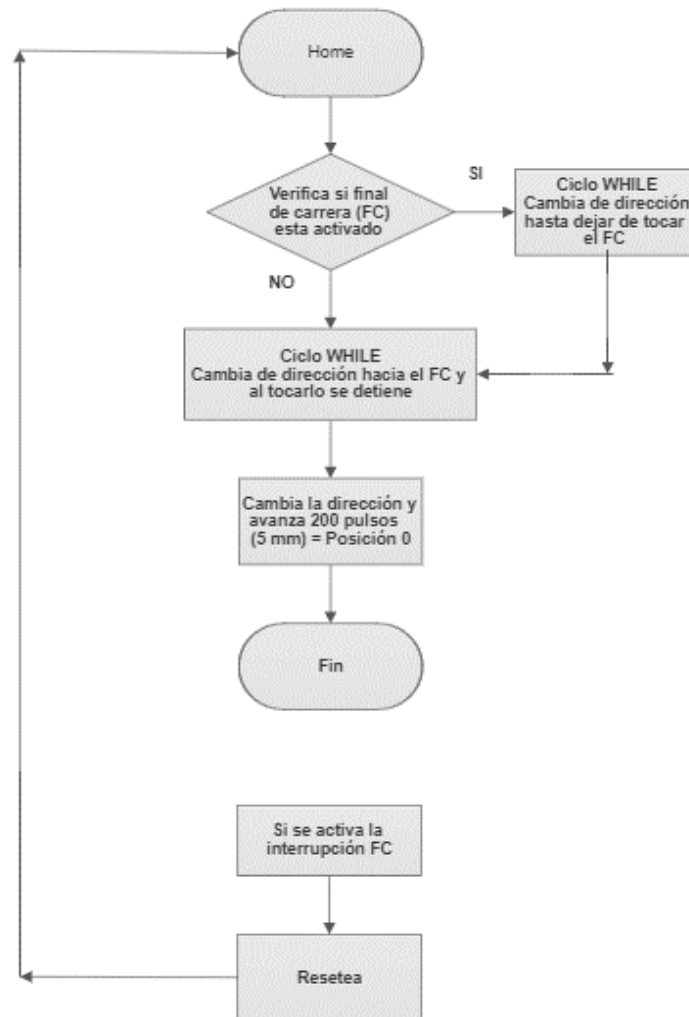
6.10 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL PUNTO A PUNTO

El Control de posicionamiento punto a punto que se implementó en este proyecto es un sistema de control a lazo abierto el cual tiene el siguiente funcionamiento: Las coordenadas son enviadas mediante la comunicación serial desde una interfaz gráfica desarrollada en el programa Matlab (Ilustración 57), hacia el microcontrolador Arduino Mega 2560 en el cual esta embebido un programa escrito en el software de Arduino (Anexo D) el cual se divide en 3 partes, una de posicionamiento de Home, una de interrupción que se ejecuta cada vez que se detecta un final de carrera y otra que interpreta las coordenadas recibidas y envía las señales hacia los drivers pololu A4988 los cuales permiten el paso de energía a cada uno de los motores.



En la Ilustración 58, se describe la rutina de control que ejecuta el programa para establecer una posición de Home, esta es una posición a la cual todos los ejes deben estar siempre antes de ejecutarse la rutina de control principal, esta rutina se ejecutará siempre que se encienda la máquina, ya que por diversos motivos los ejes pueden estar en cualquier posición al iniciar y debido a que el motor paso a paso no devuelve la posición en la que esta se hace necesario llevar a una posición conocida y desde ahí empezar a moverse.

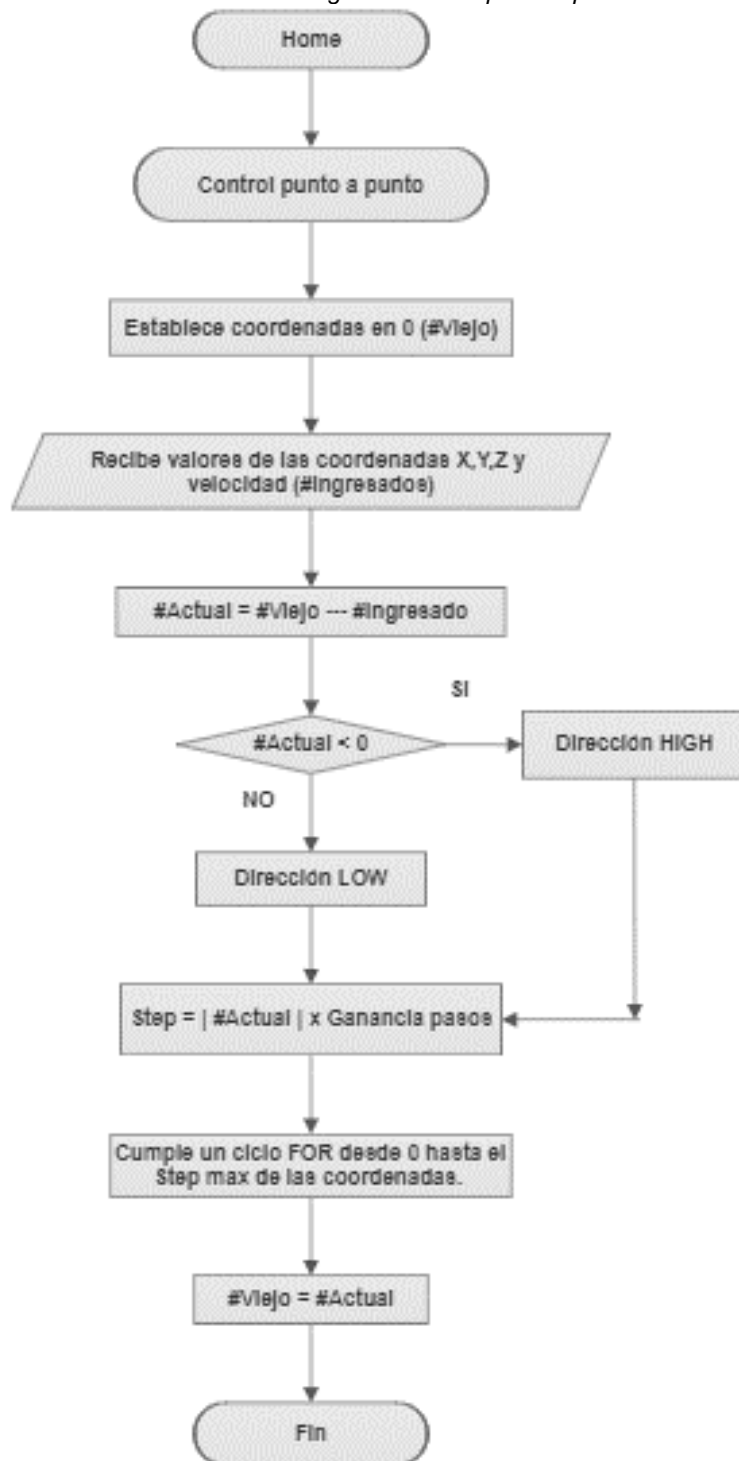
Ilustración 58 Diagrama rutina para establecer Home e interrupción



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

En la ilustración 59, se describe la rutina que se encarga de interpretar las coordenadas recibidas por el puerto serial, la cual convierte estos datos en cantidad de pasos para cada motor y establece una dirección, posteriormente compara cuál es el valor mayor de pasos y ejecuta un ciclo que se repite hasta dicha cantidad, comparando en cada momento la variable global de ciclo con la que almacena la cantidad de pasos para cada motor, en el momento en que sea mayor no se le enviarán señales a el motor correspondiente hasta terminar el ciclo, luego se almacena el valor de la coordenada ingresada en otra variable de posición para que la rutina sepa en cada momento en donde se encuentra cada eje.

Ilustración 59 Diagrama Control punto a punto



Fuente: Autor del proyecto, (2017)

En el anexo E, se plantea el manual de operación del control del Robot y el mantenimiento del mismo.

7. CONCLUSIONES

1. Se plantearon 3 opciones de diseño mecánico en donde se escogió la alternativa en la cual la herramienta de corte se desplaza en los 3 ejes independientemente, este diseño cumple los requerimientos del cliente y de diseño superando los otros dos. Se seleccionó como material a mecanizar la espuma de poliuretano expandido por su fácil maquinabilidad.
2. Se realizó un modelo en 3D por medio del software SolidWorks que permitió establecer las geometrías sobre las cuales se desarrollaron los cálculos estructurales de los componentes críticos como lo son las vigas principales y perfiles de los carros. Por medio de la simulación y el resultado de los cálculos se comprobó que las geometrías seleccionadas eran las adecuadas para la construcción de la mesa cartesiana.
3. Se seleccionó un motor paso a paso Nema 17hs4401 para el movimiento de los ejes, un driver pololu A4988 para mover los motores y se utilizó el Arduino Mega 2560 como microcontrolador para establecer la comunicación entre el computador y los demás elementos electrónicos.
4. Se logró construir la mesa cartesiana XYZ, comprobando que cada uno de los ejes se mueve de manera precisa y eficaz.
5. Se realizó un control punto a punto a lazo abierto, embebiendo en el Arduino Mega 2560 una rutina hecha desde el programa Arduino, que interpreta las señales recibidas por el puerto serial de la interfaz gráfica de Guide-Matlab, la cual convierte la señal de posición en cantidad de pasos necesarios para el movimiento de cada motor, además de permitir seleccionar 3 velocidades de avance diferentes. El control se realizó mediante la implementación de 3 rutinas, la primera consiste en llevar la maquina a una posición de home, la siguiente resetea el programa cada vez que una interrupción sea activada evitando el choque de la maquina al final de los ejes, y la última se encarga del movimiento en general aplicando la cantidad de pasos necesarios y la dirección de movimiento.

8. TRABAJOS FUTUROS

Se deja construido un Robot cartesiano completamente funcional en todos los 3 ejes para los que fue diseñado, se espera se siga trabajado en el mejoramiento del Robot Implementando un Control más Robusto y que permita la interpretación de códigos G usados en máquinas CNC de uso industrial, razón por la cual se dejan instalados por cada eje Sensores Rotativos Encoders, debido a que en el momento de realizar un mecanizado es necesario tener una mayor precisión que con el control que se implementó en este proyecto, implementando un control a lazo cerrado donde la realimentación de la posición de los ejes es enviada a el micro controlador por los Encoders.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACUÑA, Fausto y SANCHEZ, Wilson. (2005). *Diseño y Construcción de un prototipo de una maquina taladradora de control numérico computarizado*.
- [2] AEN/CTN 116. (s.f.). -Sistemas Industriales Automatizados.
- [3] AMESTOY, M. (2007). Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos.
- [4] ANSI RIA R15.06 . (s.f.). - Robot and Robot System Safety.
- [5] ARANGO, John y ZULUAGA, Carlos. (2012). Diseño de los sistemas eléctrico y de control para una mesa cartesiana XYZ.
- [6] BAUTISTA, Doris y TUFIÑO, Rodrigo. (2007). Diseño y Construcción de un Robot Cartesiano para la Manipulación e Identificación de Figuras geométricas a través de medios ópticos utilizando redes neuronales.
- [7] CARVAJAL, Jaime; GODOY, Rubén y RODRIGUEZ Willy. (2009). Proyecto mecatrónico de brazo robot cartesiano integrado a una celda de almacenamiento y recuperación automatizada AS / RS de un Sistema Flexible de Manufactura FMS.
- [8] CAZAR, Marco. (2008). Diseño y construcción de una fresadora de 3 ejes y su software de control para el mecanizado de figuras geométricas formadas por líneas rectas en superficies de madera.
- [9] CEN 310. (s.f.). – Advanced Automation Technologies and Their Applications.
- [10] CERDA, L. (2014). Instalaciones eléctricas y automatismos. En L. CERDA, *Instalaciones eléctricas y automatismos*. (pág. 265). España: Paraninfo.
- [11] DE PAIVA, Lamartine. (2008). Projeto de Controle Numérico para uma Mesa de Coordenadas.
- [12] GALARZA, Juan y DAVILA, Miguel. (2010). Diseño y Construcción de un taladro XYZ controlado por microcontrolador con interfaz gráfica mediante LabVIEW para la fabricación de circuitos compuestos.
- [13] GODOY, Rubén y RODRIGUEZ, Willy. (2007). Diseño y Modelamiento de un Robot Cartesiano para el Posicionamiento de Piezas.
- [14] GROOVER, Mikell. (1997). Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall.
- [15] HERNANDEZ, Alejandro. (2014). Control de Una Fresadora CNC de uso Didactico.

- [16] INCA, Javier y RENGIFO, Paul. (2015). *Diseño e Implementación de un sistema HMI para un prototipo de maquina fresadora utilizando control numérico computacional para elaborar placas de circuitos electrónicos.*
- [17] Introduccion a la ingenieria Industrial. (1988). En V. R.C, *Introduccion a la ingenieria Industrial* (pág. 78). Barcelona: Reverte 2 ed.
- [18] ISO 10218:1992 . (s.f.). – Manipulating Industrial Robots – Safety.
- [19] ISO 9283: 1998. (s.f.). - Performance Criteria and Related Test Methods.
- [20] ISO TC 184. (s.f.). - Automation Systems and Integration.
- [21] MARTINEZ, Luis; RONQUILLO, Felipe y ZUÑIGA, Manuel. ((s.f.)). Robot Cartesiano.
- [22] MAURO, Andrés y ANIGSTEN, Mauricio. (2013). Sobre el sistema de control de un robot cartesiano.
- [23] MENA, Alex. (2010). Propuesta de diseño de un manipulador cartesiano.
- [24] MOTT, R. (2009). *Resistencia de Materiales*. Mexico.
- [25] NTC 1486. (s.f.). Documentación. Presentación De Tesis, Trabajos De Grado Y Otros Trabajos De Investigación.
- [26] NTC 5613. (s.f.). Referencias Bibliográficas Contenido Forma Y Estructura.
- [27] OLIER, Iván; AVILES, Oscar y HERNANDEZ, Juan. (1999). Una introducción a la robótica industrial.
- [28] PALLÁS, Ramon. (2003). Sensores digitales y acondicionadores de señal. En R. PALLÁS, *Sensores digitales y acondicionadores de señal*. (pág. 3). España: Marcombo.
- [29] PONSÁ, Pere y GRANOLLERS, Antoni. ((s.f.)). Diseño y automatixzacion industrial.
- [30] RAMERA, J. y. (1997). Autómatas programables. España. En J. y. RAMERA, *Autómatas programables*. España (págs. 121-122). España: Marcombo.
- [31] RAMIREZ, Juan; CORREA, Julio y FLOREZ Santiago. . (2013). Diseño de la Plataforma mecánica de una mesa cartesiana XYZ automatizada.
- [32] Robots industriales. (s.f.) . (Recuperado el 20 de agosto de 2015, de

http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm).

- [33] Robots industriales. (s.f.). (Recuperado el 20 de agosto de 2015, de http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/industrial.htm).
- [34] ROJAS, Jorge; MAHLA Ingeborg; MUÑOZ Gerardo y CASTRO Daniel. . (2003). Diseño de un sistema robótico cartesiano para aplicaciones industriales.
- [35] ROSS, L., STEPHEN, F., & JAMES, M. y. (2011). *Robotics: Theory and Industrial Applications*.
- [36] Sistemas Digitales y electronica digital, practicas de laboratorio. ((s.f.)). En Anonimo, *Sistemas Digitales y electronica digital, practicas de laboratorio*. (pág. 192). Mexico: Pearson.
- [37] ALONZO, C. (2010) Implementación del sistema de controles de producción para la elaboración de la espuma de poliuretano, para la industria manufacturera.
- [38] Espumas. (s.f.). (Recuperado el 20 de agosto de 2017, de <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pu/espuma.htm>
- [39] Aprendizaje (s.f.). (Recuperado el 20 de agosto de 2017, de http://www.aprendizaje.com.mx/Curso/Proceso2/Temario2_VII.html

10. ANEXOS

ANEXO A.

PROPIEDADES ALUMINIO 6063

-6063- (ALUMINIO – MAGNESIO – SILICIO)

COMPOSICIÓN QUÍMICA

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
Mínimo	0,30	0,10			0,40					
Máximo	0,60	0,30	0,10	0,30	0,60	0,05	0,15	0,20	0,15	El resto

PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)

Estado	Características a la tracción			Límite a la fatiga N/mm ²	Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²	Dureza Brinell (HB)
	Carga de rotura R _m . N/mm ²	Límite elástico R _p 0,2. N/mm ²	Alargamiento A 5,65%			
O	100	50	27	110	70	25
T1	150	90	26	150	95	45
T4	160	90	21	150	110	50
T5	215	175	14	150	135	60
T6	245	210	14	150	150	75
T8	260	240			155	80

PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)

Módulo elástico N/mm ²	Peso específico g/cm ³	Intervalo de fusión °C	Coefficiente de dilatación lineal 1/10 ⁻⁶ K	Conductividad térmica W/m K	Resistividad eléctrica a 20°C - $\mu\Omega$ cm	Conductividad eléctrica % IACS	Potencial de disolución V
69,500	2,70	615-655	23,5	T1-193 T5-209	T1-3,4 T5-3,1	T1-50,5 T5-55,5	-0,80

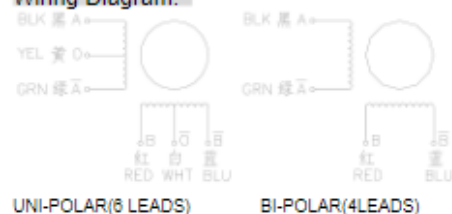
Fuente: Mundial de Aluminios S.A

ANEXO B.

DATASHEET MOTOR PASO A PASO NEMA 17



Wiring Diagram:

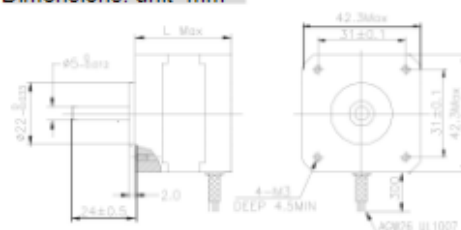


Electrical Specifications:

Series Model	Step Angle (deg)	Motor Length (mm)	Rated Current (A)	Resistance (ohm)	Inductance (mH)	Holding Torque (N.cm Min)	Detent Torque (N.cm Max)	Rotor Inertia (g.cm ²)	Lead Motor Wire Weight (No.) (g)
17HS2408 1.8	1.8	28	0.6	8	10	12	1.6 34		4 150
17HS3401 1.8	1.8	34	1.3	2.4	2.8	28	1.6 34		4 220
17HS3410 1.8	1.8	34	1.7	1.2	1.8	28	1.6 34		4 220
17HS3430 1.8	1.8	34	0.4	30	35	28	1.6 34		4 220
17HS3630 1.8	1.8	34	0.4	30	18	21	1.6 34		6 220
17HS3616 1.8	1.8	34	0.16	75	40	14	1.6 34		6 220
17HS4401 1.8	1.8	40	1.7	1.5	2.8	40	2.2 54		4 280
17HS4402 1.8	1.8	40	1.3	2.5	5.0	40	2.2 54		4 280
17HS4602 1.8	1.8	40	1.2	3.2	2.8	28	2.2 54		6 280
17HS4630 1.8	1.8	40	0.4	30	28	28	2.2 54		6 280
17HS8401 1.8	1.8	48	1.7	1.8	3.2	52	2.6 68		4 350
17HS8402 1.8	1.8	48	1.3	3.2	5.5	52	2.6 68		4 350
17HS8403 1.8	1.8	48	2.3	1.2	1.6	46	2.6 68		4 350
17HS8630 1.8	1.8	48	0.4	30	38	34	2.6 68		6 350

*Note: We can manufacture products according to customer's requirements.

Dimensions: unit=mm



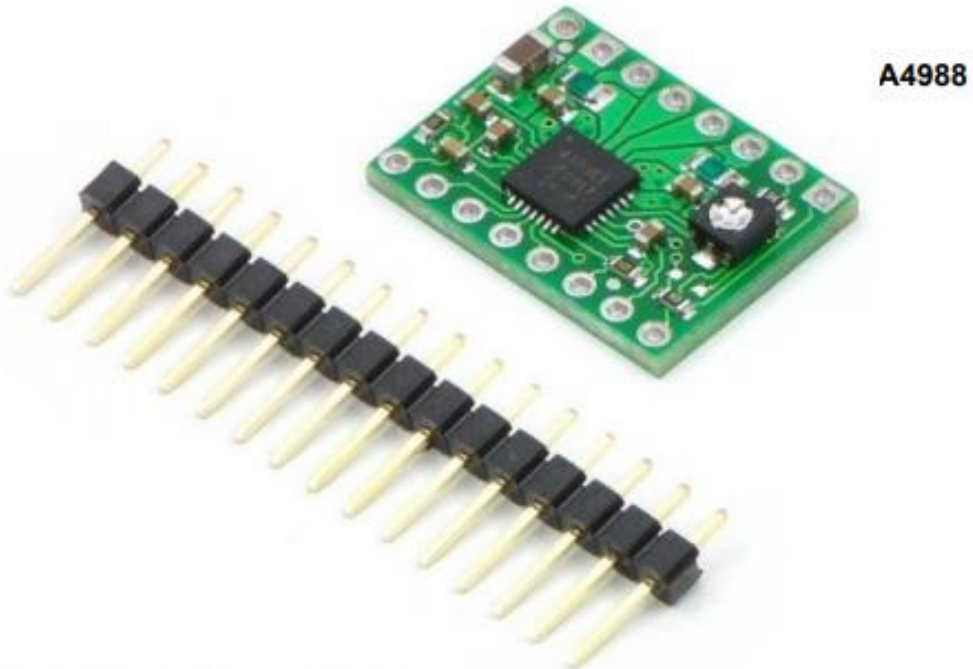
Motor Length:

Model	Length
17HS2XXX	28 mm
17HS3XXX	34 mm
16HS4XXX	40 mm
16HS8XXX	48 mm

Fuente: <http://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/MotionKing/17HS4401/pdf.php?id=928661>

ANEXO C.

DATASHEET DRIVER POLOLU A4988



Stepper Motor Driver Carrier

The A4988 stepper motor driver carrier is a breakout board for Allegro's easy-to-use A4988 microstepping bipolar stepper motor driver and is a drop-in replacement for the [A4983 stepper motor driver carrier](#). The driver features adjustable current limiting, overcurrent protection, and five different microstep resolutions. It operates from 8 – 35 V and can deliver up to 2 A per coil.

Note: This board is a drop-in replacement for the original [A4983 stepper motor driver carrier](#). The newer A4988 offers overcurrent protection and has an internal 100k pull-down on the MS1 microstep selection pin, but it is otherwise virtually identical to the A4983.

Description

Overview

This product is a carrier board or breakout board for Allegro's A4988 DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection; we therefore recommend careful reading of the [A4988 datasheet](#) (380k pdf) before using this product. This stepper motor driver lets you control one [bipolar stepper motor](#) at up to 2 A output current per coil (see the Power Dissipation Considerations section below for more information). Here are some of the driver's key features:

- Simple step and direction control interface
- Five different step resolutions: full-step, half-step, quarter-step, eighth-step, and sixteenth-step
- Adjustable current control lets you set the maximum current output with a potentiometer, which lets you use voltages above your stepper motor's rated voltage to achieve higher step rates
- Intelligent chopping control that automatically selects the correct current decay mode (fast decay or slow decay)
- Over-temperature thermal shutdown, under-voltage lockout, and crossover-current protection
- Short-to-ground and shorted-load protection (this feature is not available on the [A4983](#))

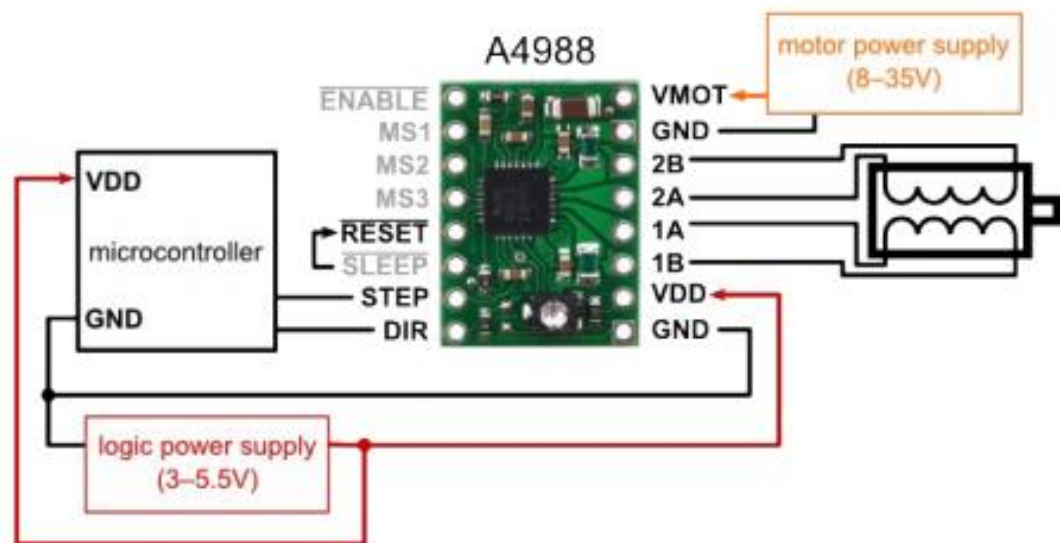
Like nearly all our other carrier boards, this product ships with all surface-mount components—including the A4988 driver IC—installed as shown in the product picture.

We also sell a [larger version of the A4988 carrier](#) that has reverse power protection on the main power input and built-in 5 V and 3.3 V voltage regulators that eliminate the need for separate logic and motor supplies.

Included hardware

The A4988 stepper motor driver carrier comes with one 1×16-pin breakaway [0.1" male header](#). The headers can be soldered in for use with [solderless breadboards](#) or [0.1" female connectors](#). You can also solder your motor leads and other connections directly to the board.

Using the driver



Minimal wiring diagram for connecting a microcontroller to an A4988 stepper motor driver carrier (full-step mode).

Power connections

The driver requires a logic supply voltage (3 – 5.5 V) to be connected across the VDD and GND pins and a motor supply voltage of (8 – 35 V) to be connected across VMOT and GND. These supplies should have appropriate decoupling capacitors close to the board, and they should be capable of delivering the expected currents (peaks up to 4 A for the motor supply).

Motor connections

Four, six, and eight-wire stepper motors can be driven by the A4988 if they are properly connected; a [FAQ answer](#) explains the proper wirings in detail.

Warning: Connecting or disconnecting a stepper motor while the driver is powered can destroy the driver. (More generally, rewiring anything while it is powered is asking for trouble.)

Warning: Connecting or disconnecting a stepper motor while the driver is powered can destroy the driver. (More generally, rewiring anything while it is powered is asking for trouble.)

Step (and microstep) size

Stepper motors typically have a step size specification (e.g. 1.8° or 200 steps per revolution), which applies to full steps. A microstepping driver such as the A4988 allows higher resolutions by allowing intermediate step locations, which are achieved by energizing the coils with intermediate current levels. For instance, driving a motor in quarter-step mode will give the 200-step-per-revolution motor 800 microsteps per revolution by using four different current levels.

The resolution (step size) selector inputs (MS1, MS2, MS3) enable selection from the five step resolutions according to the table below. MS1 and MS3 have internal 100kΩ pull-down resistors and MS2 has an internal 50kΩ pull-down resistor, so leaving these three microstep selection pins disconnected results in full-step mode. For the microstep modes to function correctly, the current limit must be set low enough (see below) so that current limiting gets engaged. Otherwise, the intermediate current levels will not be correctly maintained, and the motor will effectively operate in a full-step mode.

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	Quarter step
High	High	Low	Eighth step
High	High	High	Sixteenth step

Control inputs

Each pulse to the STEP input corresponds to one microstep of the stepper motor in the direction selected by the DIR pin. Note that the STEP and DIR pins are not pulled to any particular voltage internally, so you should not leave either of these pins floating in your application. If you just want rotation in a single direction, you can tie DIR directly to VCC or

GND. The chip has three different inputs for controlling its many power states: RST, SLP, and EN. For details about these power states, see the datasheet. Please note that the RST pin is floating; if you are not using the pin, you can connect it to the adjacent SLP pin on the PCB.

Current limiting

To achieve high step rates, the motor supply is typically much higher than would be permissible without active current limiting. For instance, a typical stepper motor might have a maximum current rating of 1 A with a 5 Ω coil resistance, which would indicate a maximum motor supply of 5 V. Using such a motor with 12 V would allow higher step rates, but the current must actively be limited to under 1 A to prevent damage to the motor.

The A4988 supports such active current limiting, and the trimmer potentiometer on the board can be used to set the current limit. One way to set the current limit is to put the driver into full-step mode and to measure the current running through a single motor coil without clocking the STEP input. The measured current will be 0.7 times the current limit (since both coils are always on and limited to 70% in full-step mode). Please note that the current limit is dependent on the Vdd voltage.

Another way to set the current limit is to measure the voltage on the "ref" pin and to calculate the resulting current limit (the current sense resistors are 0.05 Ω). The ref pin voltage is accessible on a via that is circled on the bottom silkscreen of the circuit board. See the A4988 datasheet for more information.

Power dissipation considerations

The A4988 driver IC has a maximum current rating of 2 A per coil, but the actual current you can deliver depends on how well you can keep the IC cool. The carrier's printed circuit board is designed to draw heat out of the IC, but to supply more than approximately 1 A per coil, a heat sink or other cooling method is required.

This product can get hot enough to burn you long before the chip overheats. Take care when handling this product and other components connected to it.

Please note that measuring the current draw at the power supply does not necessarily provide an accurate measure of the coil current. Since the input voltage to the driver can be significantly higher than the coil voltage, the measured current on the power supply can be quite a bit lower than the coil current (the driver and coil basically act like a switching step-down power supply). Also, if the supply voltage is very high compared to what the motor needs to achieve the set current, the duty cycle will be very low, which also leads to significant differences between average and RMS currents.

Fuente: http://documentation.echopen.org/CAT-daughter_board/DB-motor_control_v3/doc/pololu_a4988.pdf

ANEXO D.

CÓDIGO ARDUINO CONTROL PUNTO A PUNTO

```
#define STEPX 5
#define DIRX 4
#define STEPY 7
#define DIRY 6
#define STEPZ 9
#define DIRZ 8
#define ENABLE 10
#define FINALX 26
#define FINALY 22
#define FINALZ 24
//byte dato;
long STEPSX;
long STEPSY;
long STEPSZ;
int XNUEVO;
int YNUEVO;
int ZNUEVO;
int XOLD;
int YOLD;
int ZOLD;
int XACTUAL;
int VELOCIDAD;
int DELAY;
float PASOS_CM_X;
float PASOS_CM_Y;
float PASOS_CM_Z;

void(* resetFunc) (void) = 0;// Funcion de reinicio del programa

void ai0() {
    // Rutina para reiniciar el programa si se activa la interrupcion del pin 2
    resetFunc();
}

void ai1() {
    // Rutina para reiniciar el programa si se activa la interrupcion del pin 3
    resetFunc(); //call reset
}

void ai2() {
    // Rutina para reiniciar el programa si se activa la interrupcion del pin 18
    resetFunc(); //call reset
}

void setup(){

    Serial.begin(9600); // Se inicia la comunicacion serial a 9600 Bdu
    pinMode(DIRX,OUTPUT); //
    pinMode(STEPX,OUTPUT); //
    pinMode(DIRY,OUTPUT); //
    pinMode(STEPY,OUTPUT); //
    pinMode(DIRZ,OUTPUT); //      Se indica que los pines son de salida
    pinMode(STEPZ,OUTPUT); //
    pinMode(ENABLE,OUTPUT); //
    digitalWrite(ENABLE,LOW); //
    delay(5);
```

```

while (digitalRead(FINALZ)) { // Rutina de Home de Z cuando el final de carrera de home esta activado
    digitalWrite(DIRZ, HIGH);
    digitalWrite(STEPZ, HIGH);
    delayMicroseconds(900);
    digitalWrite(STEPZ, LOW);
    delayMicroseconds(900);
}

while (!digitalRead(FINALZ)) { // Rutina de Home de Z cuando el final de carrera de home no esta activado
    digitalWrite(DIRZ, LOW);
    digitalWrite(STEPZ, HIGH);
    delayMicroseconds(900);
    digitalWrite(STEPZ, LOW);
    delayMicroseconds(900);
}
if(digitalRead(DIRZ)==HIGH) {
    digitalWrite(DIRZ,LOW);
}else{
    digitalWrite(DIRZ,HIGH);
}
for (int u = 0; u < 200; u++) {
    digitalWrite(STEPZ, HIGH);
    delayMicroseconds(900);
    digitalWrite(STEPZ, LOW);
    delayMicroseconds(900);
}

// ciclo de home eje Y

while (digitalRead(FINALY)) { // Rutina de Home de Y cuando el final de carrera de home esta activado
    digitalWrite(DIRY, HIGH);
    digitalWrite(STEPY, HIGH);
    delayMicroseconds(900);
    digitalWrite(STEPY, LOW);
    delayMicroseconds(900);
}

while (!digitalRead(FINALY)) { /// Rutina de Home de Z cuando el final de carrera de home no esta activado
    digitalWrite(DIRY, LOW);
    digitalWrite(STEPY, HIGH);
    delayMicroseconds(900);
    digitalWrite(STEPY, LOW);
    delayMicroseconds(900);
}
if(digitalRead(6)==HIGH) {
    digitalWrite(DIRY,LOW);
}else{
    digitalWrite(DIRY,HIGH);
}
for (int u = 0; u < 200; u++) {
    digitalWrite(STEPY, HIGH);
    delayMicroseconds(900);
    digitalWrite(STEPY, LOW);
    delayMicroseconds(900);
}

// Ciclo home Z

while (digitalRead(FINALX)) { // Rutina de Home de X cuando el final de carrera de home esta activado
    digitalWrite(DIRX, HIGH);
    digitalWrite(STEPX, HIGH);
    delayMicroseconds(900);
    digitalWrite(STEPX, LOW);
    delayMicroseconds(900);
}

while (!digitalRead(FINALX)) { // Rutina de Home de X cuando el final de carrera de home no esta activado
    digitalWrite(DIRX, LOW);
    digitalWrite(STEPX, HIGH);
    delayMicroseconds(900);
    digitalWrite(STEPX, LOW);
    delayMicroseconds(900);
}

```

```

    if(digitalRead(DIRX)==LOW) {
        digitalWrite(DIRX,HIGH);
    }else{
        digitalWrite(DIRX,LOW);
    }
    for (int u = 0; u < 200; u++) {
        digitalWrite(STEPX, HIGH);
        delayMicroseconds(900);
        digitalWrite(STEPX, LOW);
        delayMicroseconds(900);
    }

    digitalWrite(ENABLE,HIGH); // Se apagan los drivers de lo motores para evitar calentamiento y consumo inecesario de energia
    delay(10);
    attachInterrupt(0, ai0, RISING);
    attachInterrupt(1, ai1, RISING); // Se declaran las interrupciones cuando la señal pase de un estado LOW a HIGH
    attachInterrupt(5, ai2, RISING);

    XOLD=0;
    YOLD=0; // Se inicializan las variables en cero
    ZOLD=0;
    PASOS_CM_X= 417;
    PASOS_CM_Y= 393.7; // Ganancias de pasos x cm en cada eje
    PASOS_CM_Z= 393.7;
}

void loop()

{

void serialEvent()
{
    if (Serial.available()){ // Rutina que se activa cuando hay datos disponibles en el puerto serial
        //dato=Serial.read();
        XNUEVO=Serial.parseInt();
        YNUEVO=Serial.parseInt(); // Se asigna el valor recibido desde el puerto serial a cada una de las
        ZNUEVO=Serial.parseInt(); // coordenadas y el valor para establecer la velocidad
        VELOCIDAD=Serial.parseInt();
        int XACTUAL = XOLD-XNUEVO;
        int YACTUAL = YOLD-YNUEVO; // Se calcula cuanto debe moverse cada eje respecto a el dato de coordenada anterior
        int ZACTUAL = ZOLD-ZNUEVO;

        if ( VELOCIDAD == 1){ DELAY=4000;}
        if ( VELOCIDAD == 2){ DELAY=1625;} // Se establece el valor de Delay que controla la velocidad de giro dependiendo del
        if ( VELOCIDAD == 3){ DELAY=900;} // valor enviado desde el puerto serial

        if ( XACTUAL < 0){ digitalWrite(DIRX,HIGH);}
        else{digitalWrite(DIRX,LOW);}
        if ( YACTUAL < 0){ digitalWrite(DIRY,HIGH);} // SE ESTABLECE UNA DIRECCION DEPENDIENDO EL VALOR DE COORDENADA INGRESADO
        else{digitalWrite(DIRY,LOW);}
        if ( ZACTUAL < 0){digitalWrite(DIRZ,HIGH);}
        else{digitalWrite(DIRZ,LOW);}

        STEPSX = (abs(XACTUAL)*PASOS_CM_X);
        STEPSY = (abs(YACTUAL)*PASOS_CM_Y); // SE CALCULA EN NUMERO DE PASOS A PARTIR DE LA GANANCIA DE TRANSMICION DEL EJE Y DEL VALOR DE LA COORDENADA INGRESADA
        STEPSZ = (abs(ZACTUAL)*PASOS_CM_Z);

        long max_steps = max(max(STEPSX, STEPSY), STEPSZ); //SE ESTABLECE EL VALOR DE PASOS MAXIMOS DE LOS 3 EJES
        digitalWrite(ENABLE,LOW); // SE ACTIVAN LOS DRIVERS DE LOS MOTORES

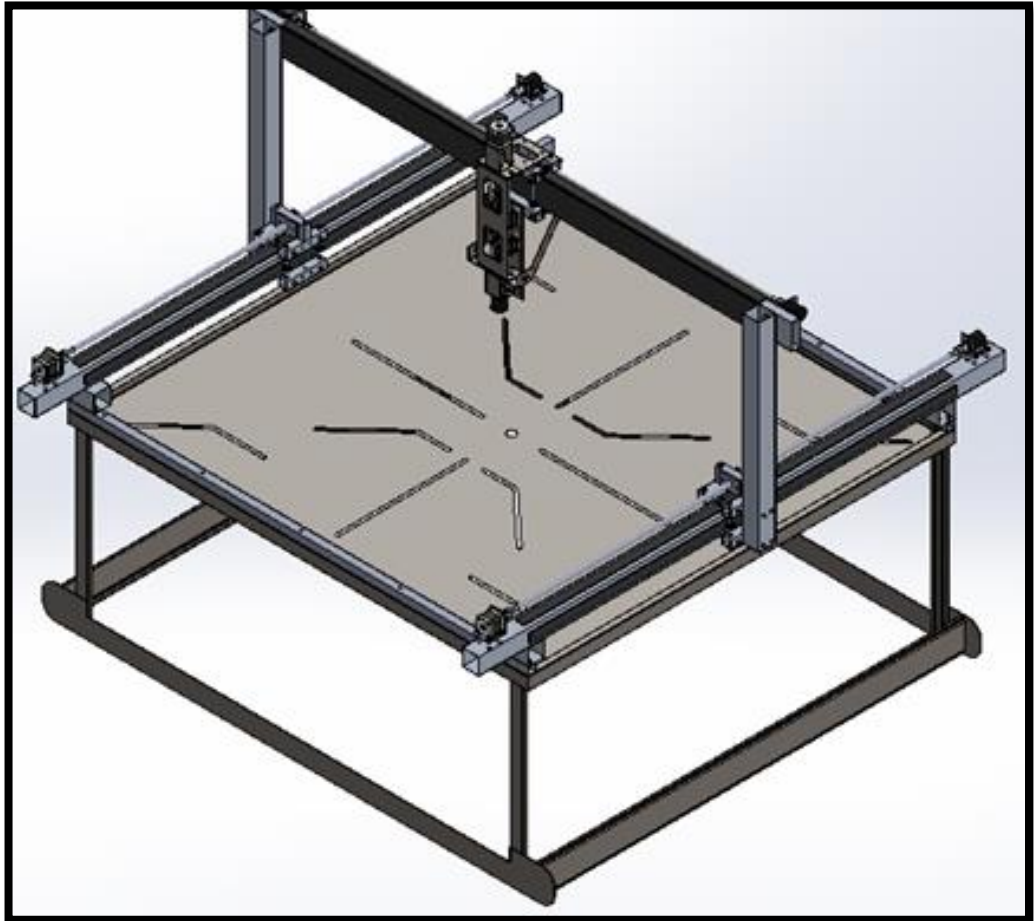
        for (long i = 0; i < max_steps; i++) {
            if (i < STEPSX) digitalWrite(STEPX, HIGH);
            if (i < STEPSY) digitalWrite(STEPY, HIGH);
            if (i < STEPSZ) digitalWrite(STEPZ, HIGH);
            delayMicroseconds(DELAY); // SE EJECUTA EL CICLO HASTA EL NUMERO MAYOR DE PASOS
            if (i < STEPSX) digitalWrite(STEPX, LOW);
            if (i < STEPSY) digitalWrite(STEPY, LOW);
            if (i < STEPSZ) digitalWrite(STEPZ, LOW);
            delayMicroseconds(DELAY);
        }

        XOLD=XNUEVO;
        YOLD=YNUEVO; // SE LE ASIGNA EL VALOR INGRESADO A LA VARIABLE DE COORDENADA ANTIGUA
        ZOLD=ZNUEVO;
        digitalWrite(ENABLE,HIGH); // SE APAGAN LOS DRIVERS DE LOS MOTORES
    }
}

```


ANEXO E.

MANUAL DE USUARIO Y MANTENIMIENTO ROBOT CARTESIANO



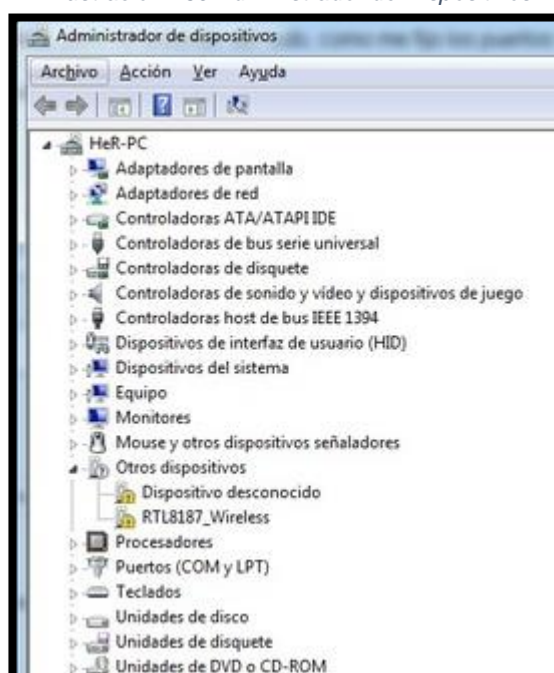
UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA MECANICA
CRISTIAN LEONARDO RODRIGUEZ RODRIGUEZ
065101029

1. Configuración del Puerto COM Arduino

Para iniciar el uso del Robot Cartesiano, lo primero que se debe hacer es configurar el puerto COM del Arduino. Por defecto el programa de control se realizó para funcionar con el puerto COM número 8, para configurar el puerto del Arduino se realizan los siguientes pasos en el computador.

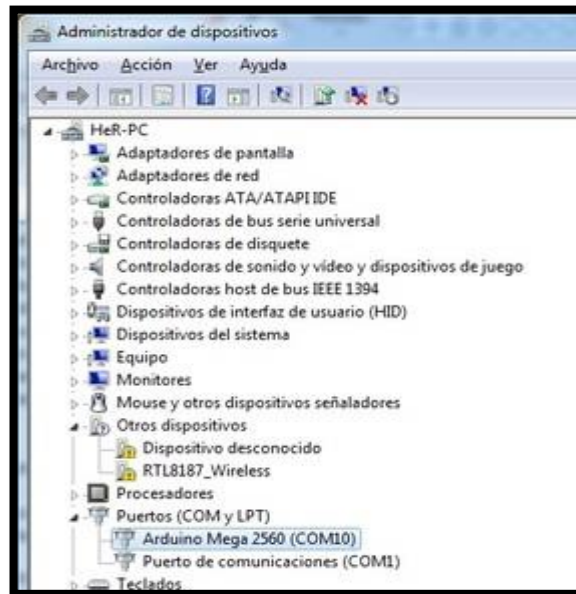
- Conectar el cable USB de comunicación del Robot Cartesiano al puerto USB del computador.
- Verificar en el administrador de dispositivos Ilustración 1 en que puerto se encuentra conectado el Arduino.

Ilustración 160 Administrador de Dispositivos



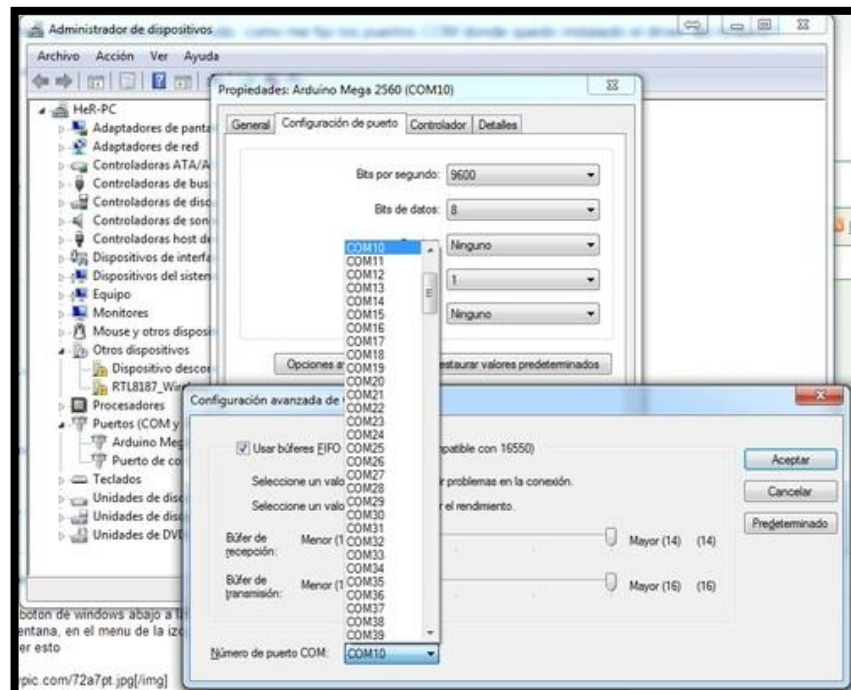
- Dar click en la sección Puertos (COM Y LPT) Ilustración 2

Ilustración 261 Puertos (COM Y LPT)



- Posicionar el mouse sobre el ARDUINO y hacer click con el botón derecho propiedades Ilustración 3. Ubicarse en Configuración de Puerto y seleccionar Opciones Avanzadas

Ilustración 362 Configuración del Puerto






- Se selecciona el puerto COM8 y se da click en aceptar.

- Se desconecta el cable de comunicación USB del computador.

2. Conexión a la Alimentación eléctrica del Robot e Inicio de la interfaz.

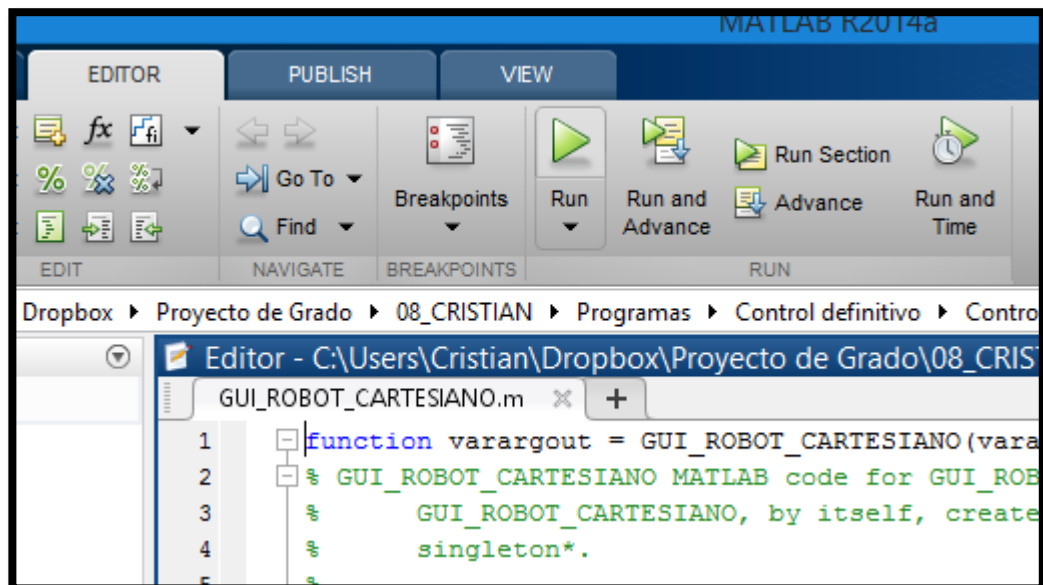
- Se conecta el cable de alimentación de la caja de control del Robot a la conexión eléctrica y se ubica el interruptor en la parte posterior de la caja de control y se poner en una posición de ON.
- Se inicia el programa de MATLAB llamado GUI_ROBOT_CARTESIANO.code Ilustración 4.

Ilustración 4 GUI ROBOT CARTESIANO

	GUI_ROBOT_CARTESIANO	03/10/2017 7:26 p....	MATLAB Figure	9 KB
	GUI_ROBOT_CARTESIANO	03/10/2017 7:34 p....	MATLAB Code	14 KB
	U	27/09/2017 9:17 a. ...	Imagen JPEG	123 KB

- Una vez el programa se inicia, dar click en el icono con el símbolo de play verde "Run". Ilustración 5

Ilustración 5 Editor de Matlab



- Se abrirá la interfaz gráfica de Comunicación con el Robot Cartesiano. Ilustración 6.

Ilustración 63 Interfaz Grafica



- Cuando la interfaz gráfica ya esté abierta se conecta el cable de comunicación USB desde la caja de control, al puerto USB del computador.
- Se espera a que el Robot se inicie y pre-configure sus ejes en una posición de HOME.
- Una vez el movimiento de los 3 ejes del robot termine se da click en Conectar en la interfaz gráfica, y se espera de nuevo a que el Robot verifique de nuevo la posición Home de cada uno de los ejes.
- Establecida la conexión por el puerto serial del computador con el Arduino, se pueden ingresar los valores de coordenadas en las cajas de texto y seleccionar una velocidad para el Robot.
- Luego se da click en el botón de ir de la interfaz gráfica y el Robot se ubicara en las coordenadas ingresadas a la velocidad seleccionada.

3. Desconexión del Robot Cartesiano

Cuando ya se vaya a desconectar y a apagar el Robot se deben seguir los siguientes pasos.

- Hacer click en la interfaz en el Botón de Desconectar. Ilustración 7.

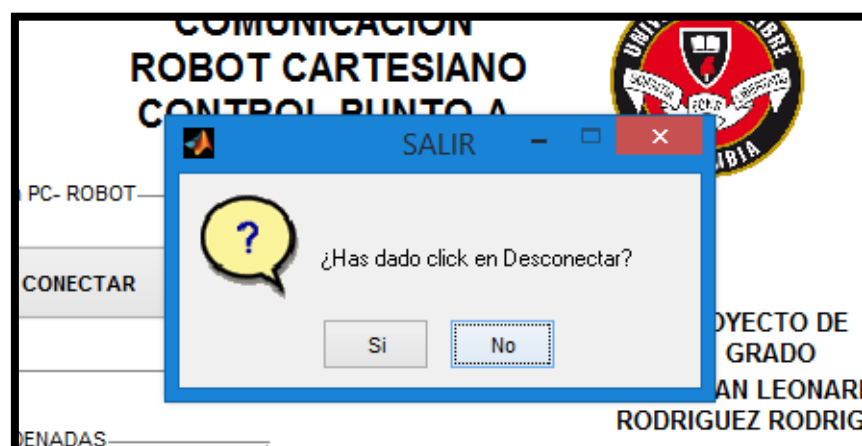
Ilustración 7 Botón Desconectar



NOTA: El paso anterior es Muy importante, ya que si no se desconecta la comunicación con el puerto serial, el puerto queda abierto y no permitirá volver a conectar el mismo.

- Una vez desconectado el Robot cartesiano se da click en cerrar ventana, en este momento saldrá una advertencia que recuerda si se desconectó el puerto serial Ilustración 8, si el paso anterior se realizó se da click en SI y el programa se cierra, de lo contrario click en NO y se realiza el paso anterior.

Ilustración 8 Verificación Desconectar el Robot



- Una vez el programa este cerrado se Desconecta el cable de Comunicación USB del computador, se pone en posición OFF el interruptor de la caja de control y se desconecta la alimentación eléctrica.

4. **Mantenimiento.**

El mantenimiento para el Robot cartesiano consiste en periódicamente revisar los siguientes elementos:

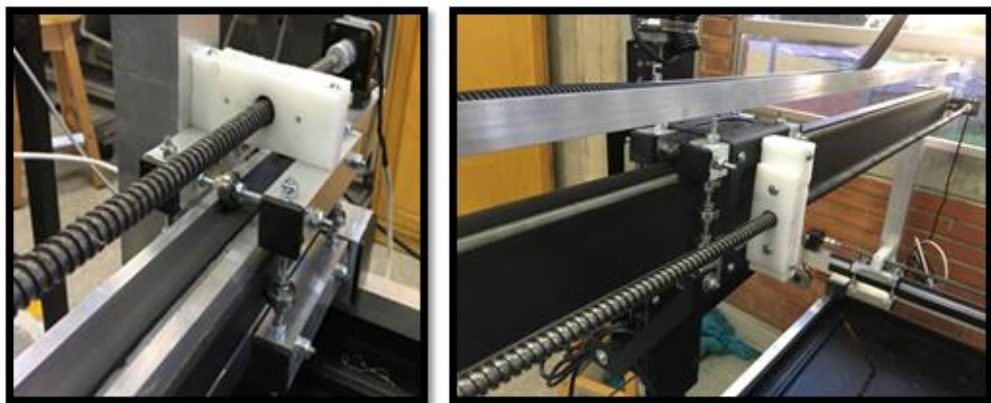
- Verificar los tornillos prisioneros de los acoples flexibles que unen los motores con las varillas roscadas. Ilustración 9

Ilustración 9 Acople Flexible



- Limpiar de virutas y usar de preferencia lubricantes secos en las varillas Roscadas de cada uno de los ejes. Ilustración 10.

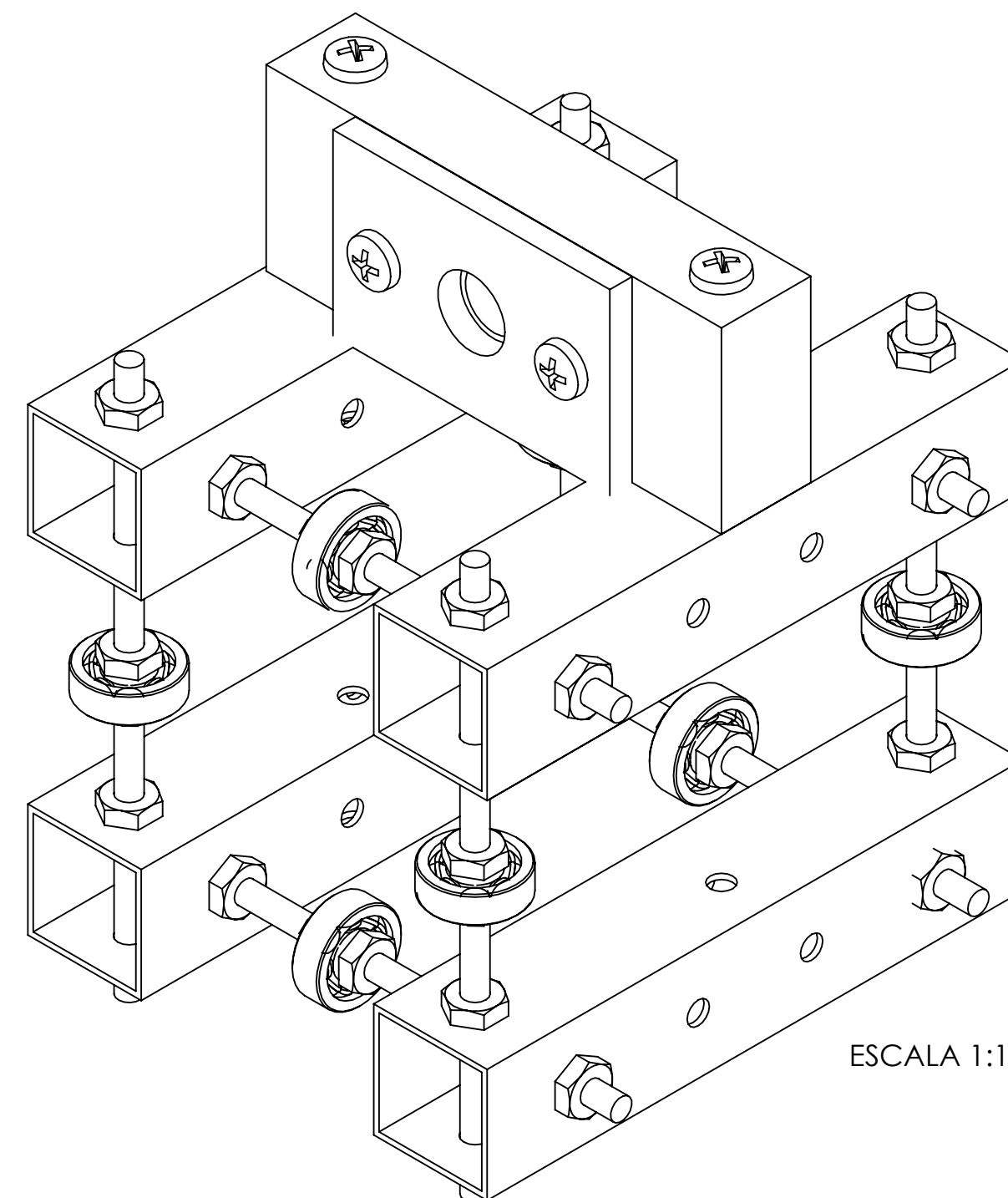
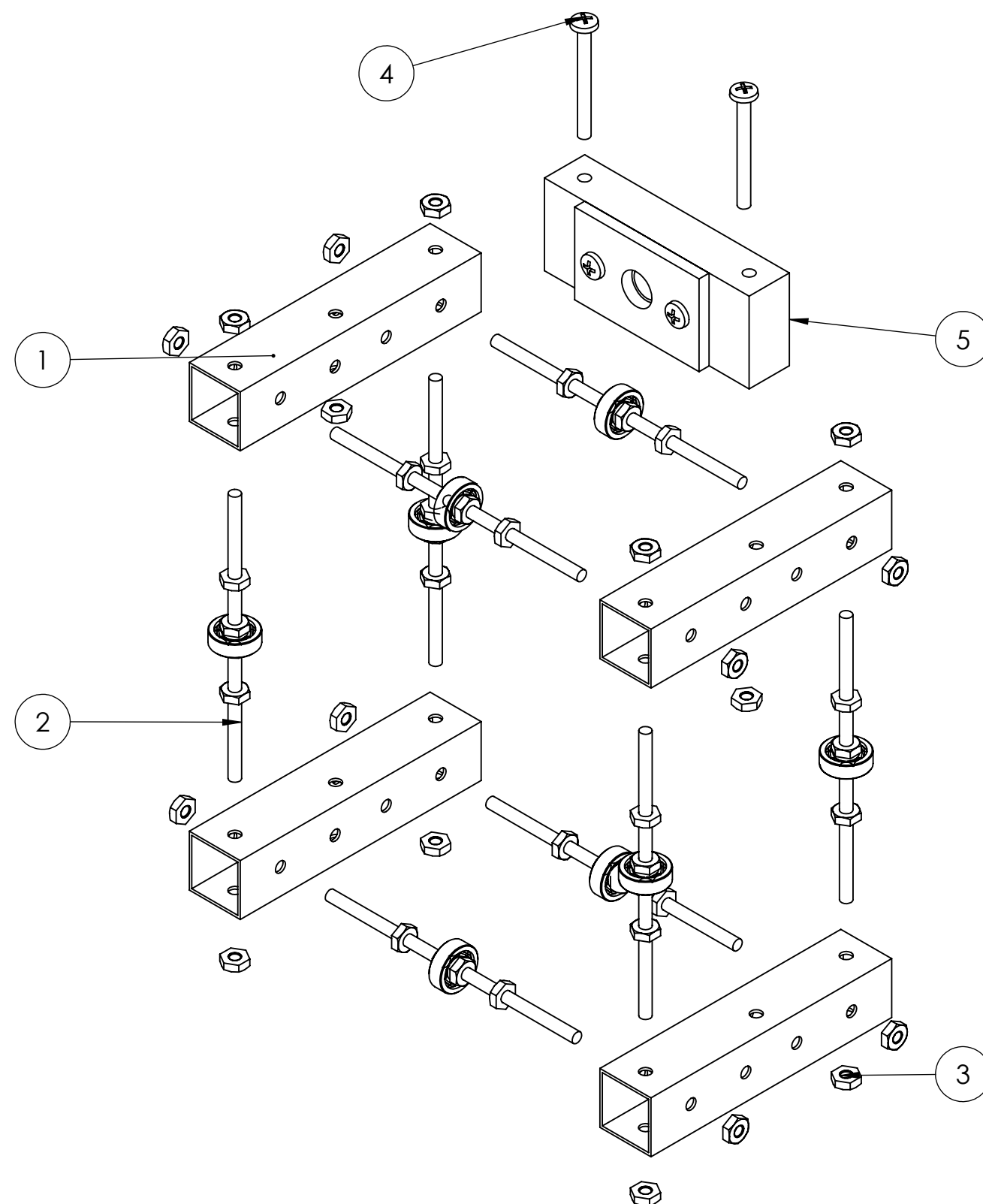
Ilustración 10 Varillas Roscadas



- Inspeccionar los cauchos de los ejes X y Y, buscando grietas o rasgaduras, si es el caso remplazar por el mismo tipo de caucho.

ANEXO F. PLANOS.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Perfil Carros Eje X	4
2	Eje Rodamiento Carro X	8
3	Tuerca de Seguridad Tornillo 3/16"	18
4	Tornillos 3/16" x 3"	2
5	Camisa Tuerca Eje X	1



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Carro Eje X

Dibujó

Cristian Rodriguez Fecha 10 Oct 2017

Material Varios

Revisó

Ing. Aguirre Fecha 10 Oct 2017

Medidas en Milímetros Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$



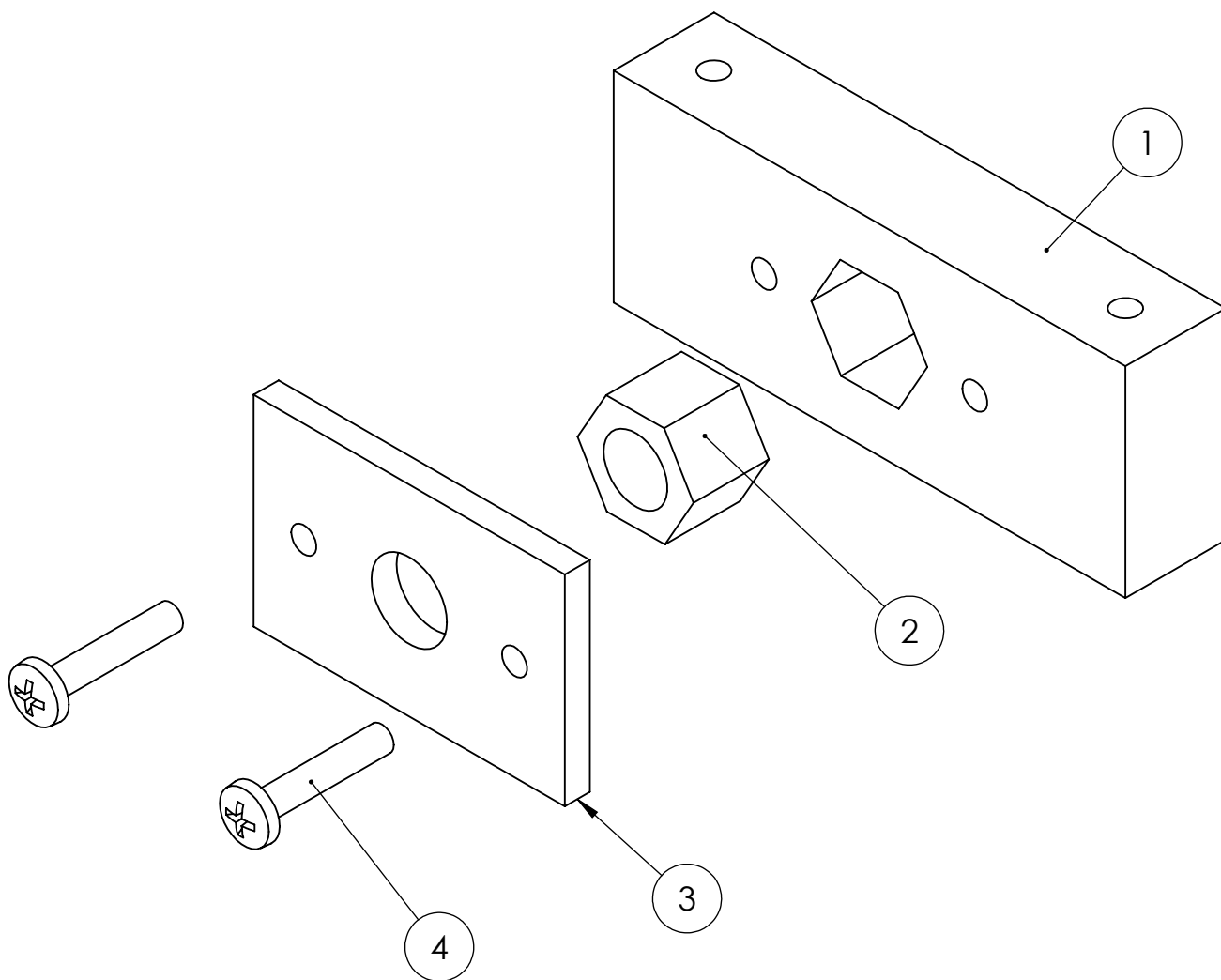
A3

Escala



1:2

No. Plano 2/48

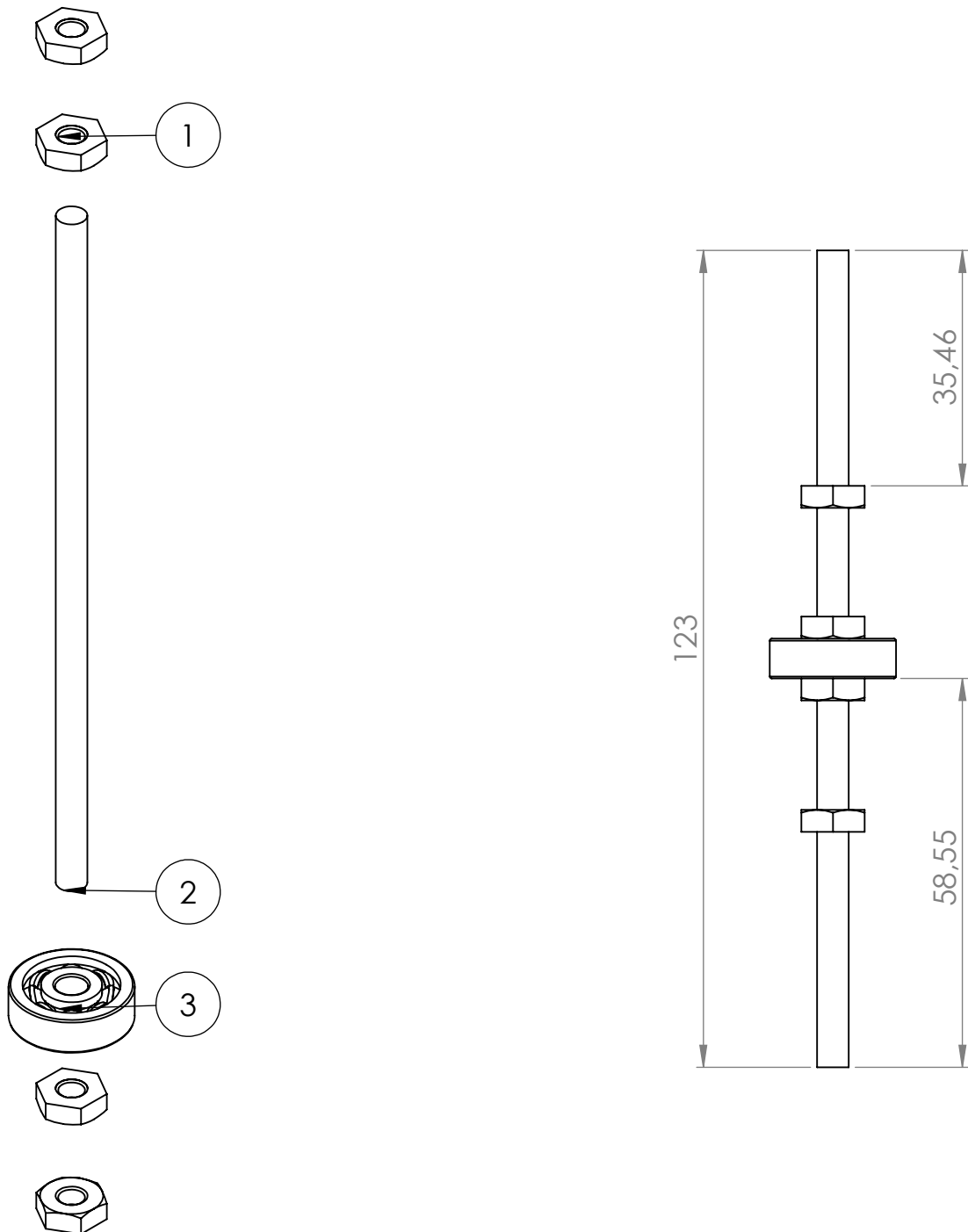
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Camisa 1Eje X	1
2	Tuerca varilla roscada perfil cuadrado 1/2"	1
3	Camisa 2 Eje X	1
4	Tornillo 3/16" x 1"	2



ROBORT CARTESIANO

ROBORT CARTESIANO									
Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingenieria Mecánica			Nombre Plano		Camisa Tuerca Carro eje X				
			Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017		
Material	Varios		Revisó		Ing. Aguirre		Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	+0.1 -0.1		A4	Escala	1:1	No. Plano	3/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tuerca de Seguridad Tornillo 3/16"	4
2	Varilla Roscada 3/16"	1
3	Rodamiento 635ZZ	1



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Eje Rodamiento Carro X

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varios

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$



A4

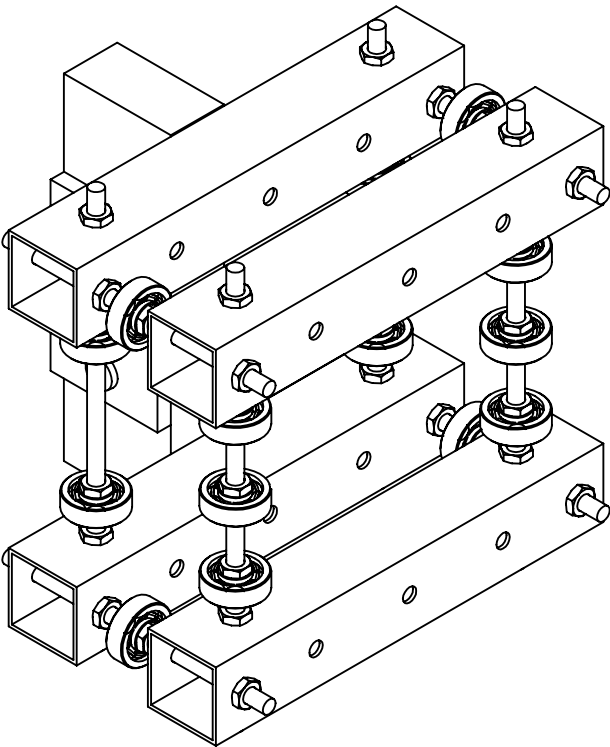
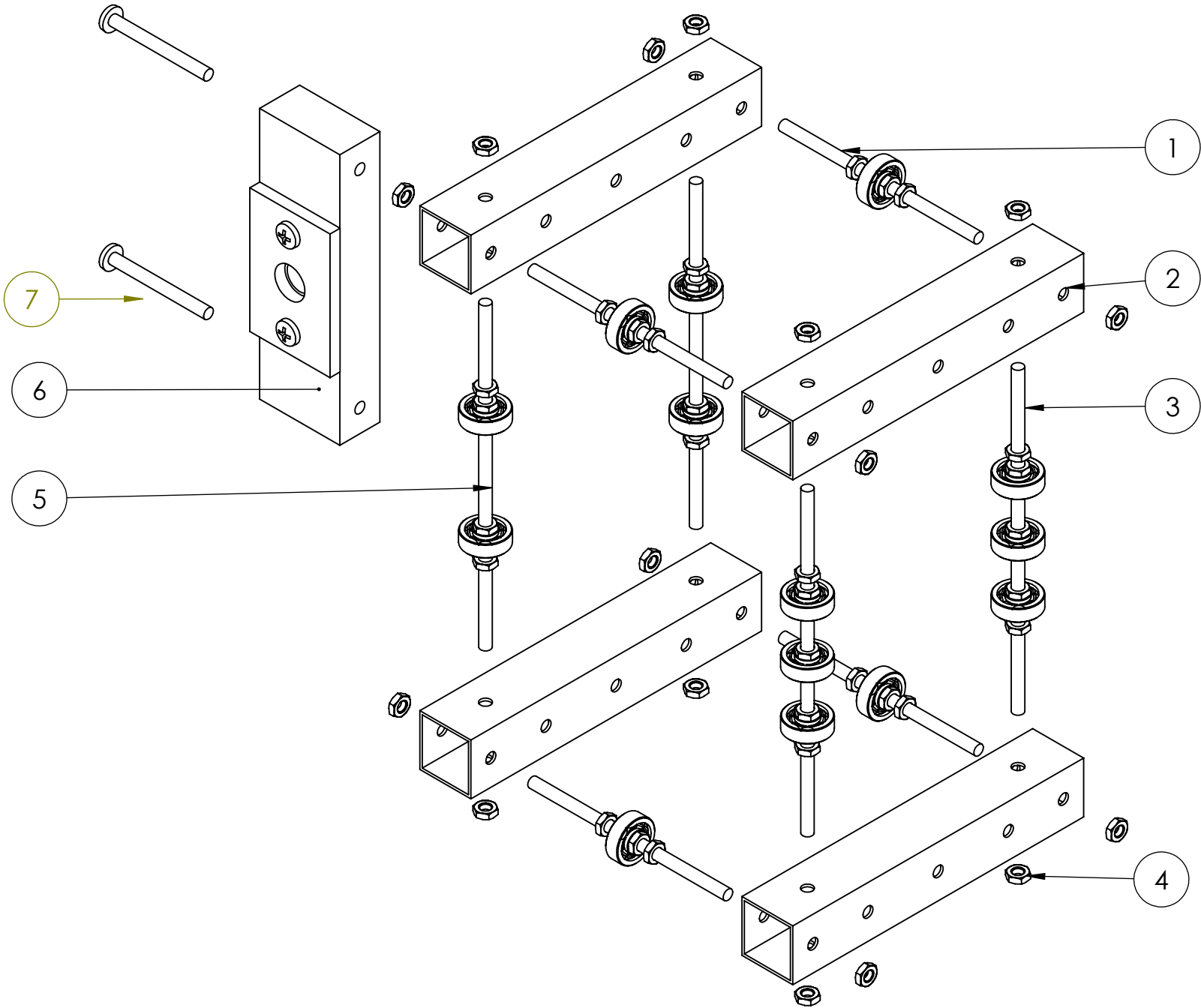
Escala



1:1

No.
Plano

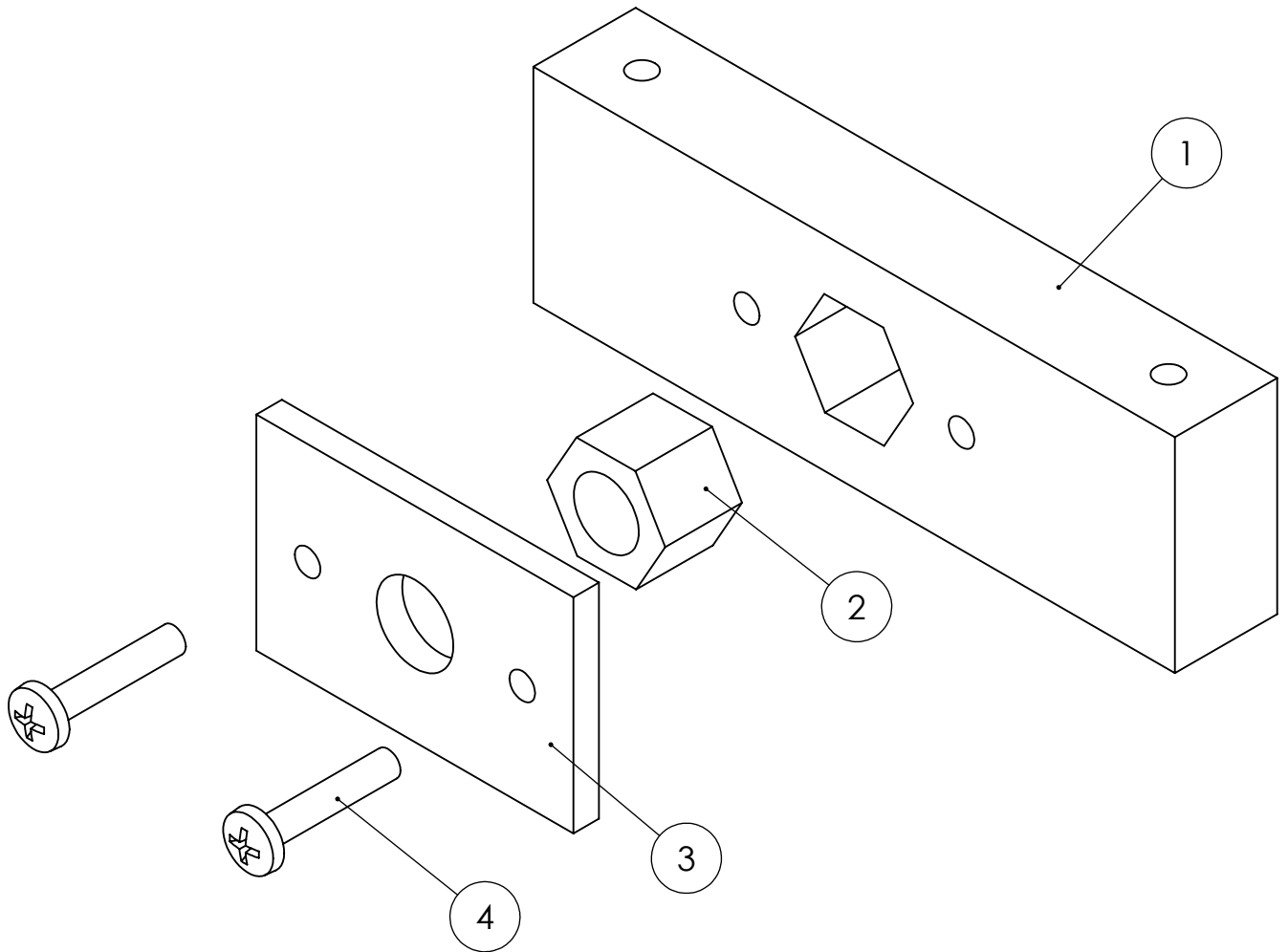
4/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Eje Rodamiento Carro Y-1	4
2	Perfil Carros Eje Y	4
3	Eje Rodamiento Carro Y-2	2
4	Tuerca de Seguridad Tornillo 3/16"	18
5	Eje Rodamiento Carro Y-3	2
6	Camisa Tuerca Eje Y	1
7	Tornillos 3/16" x 3"	2



ROBORT CARTESIANO									
Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica			Nombre Plano		Carro Eje Y				
			Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017		
Material	Varios		Revisó		Ing. Aguirre		Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	+ 0.1 - 0.1		A3	Escala	1:2	No. Plano	5/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Camisa 1 Eje Y	1
2	Tuerca varilla roscada perfil cuadrado 1/2"	1
3	Camisa 2 Eje Y	1
4	Tornillo 3/16" x 1"	2



ROBOT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Camisa Tuerca Carro Eje Y

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varios

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1



A4

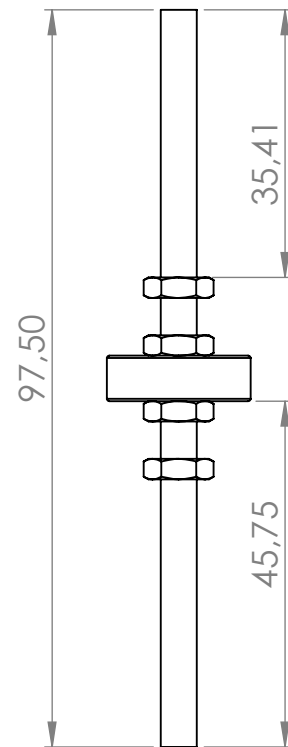
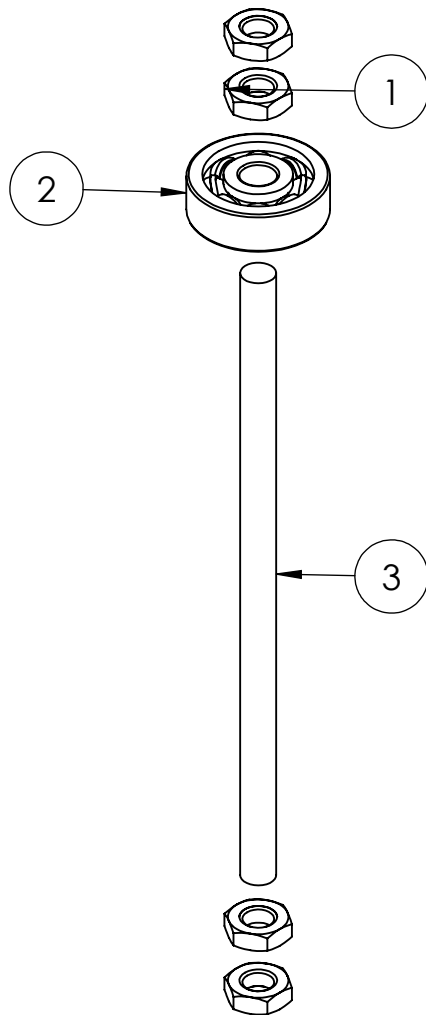
Escala

1:1



No.
Plano

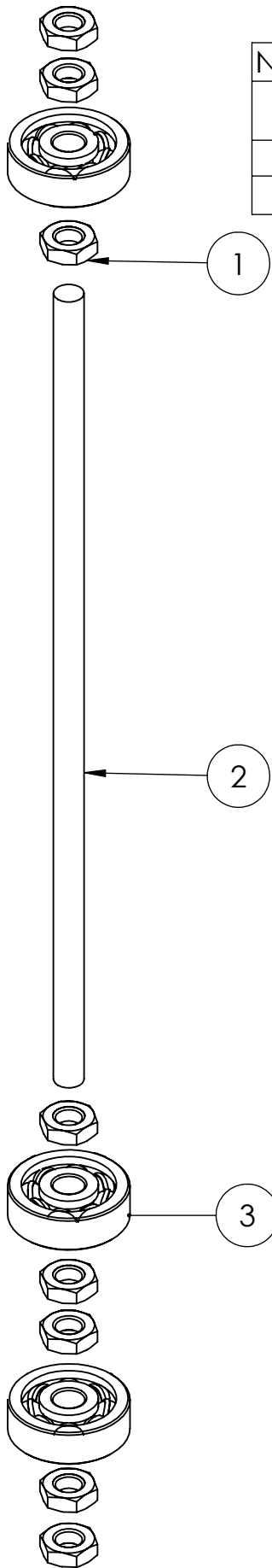
6/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Motor Nema 17 HS4401	4
2	Rodamiento 635ZZ	1
3	Varilla Roscada 3/16"	1

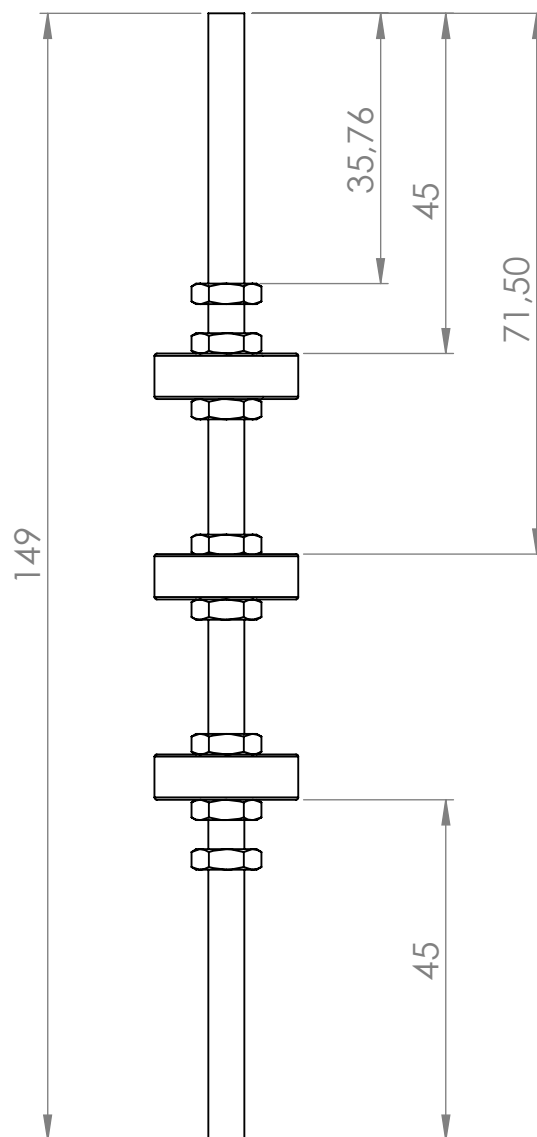


ROBOT CARTESIANO

ROBORT CARTESIANO									
Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica				Nombre Plano		Eje Rodamiento Carro Y-1			
				Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017	
Material		Varios		Revisó		Ing. Aguirre		Fecha	10 Oct 2017
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	+ - 0.1			A4	Escala	1:1	No. Plano 7/48



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tuerca de Seguridad Tornillo 3/16"	8
2	Varilla Roscada 3/16"	1
3	Rodamiento 635ZZ	3



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Eje Rodamiento Carro Y-2

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varios

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$



A4

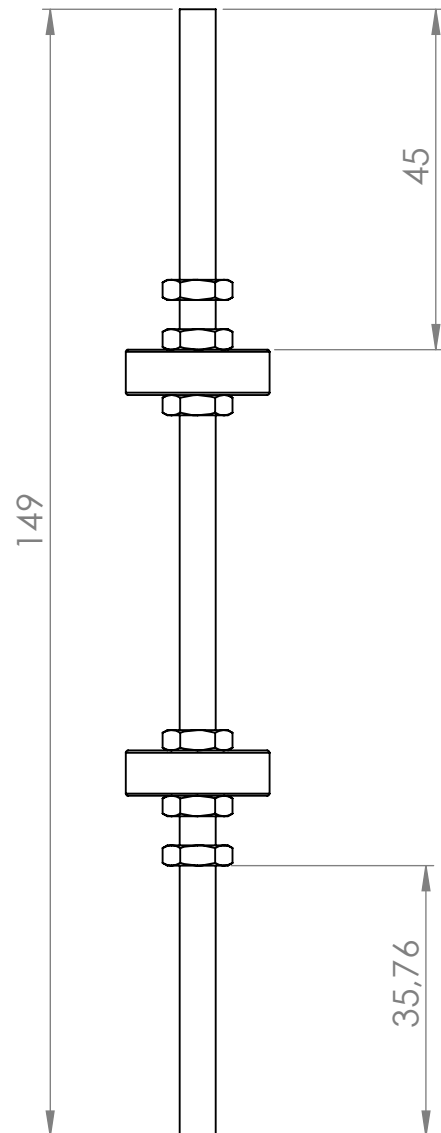
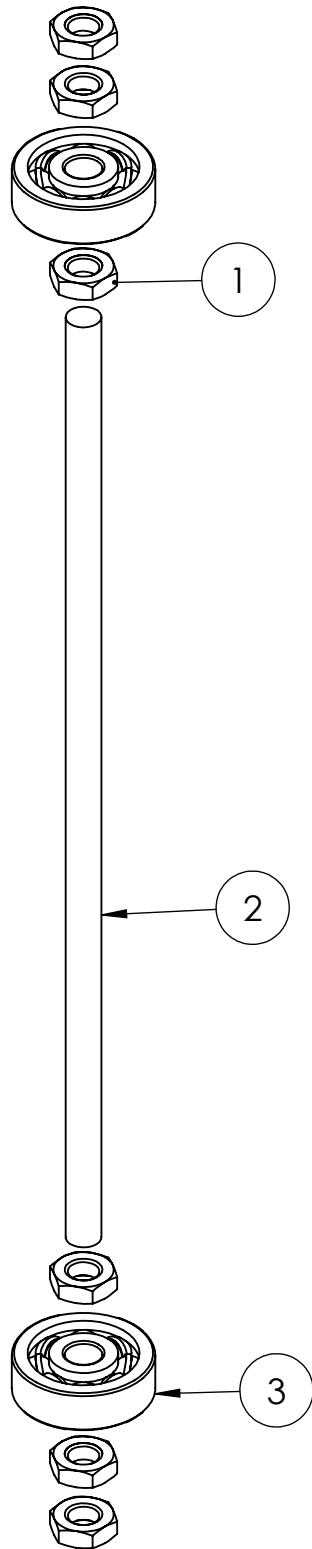
Escala

1:1

No.
Plano

8/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tuerca de Seguridad Tornillo 3/16"	6
2	Varilla Roscada 3/16"	1
3	Rodamiento 635ZZ	2



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Eje Rodamiento Carro Y-3

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varios

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$



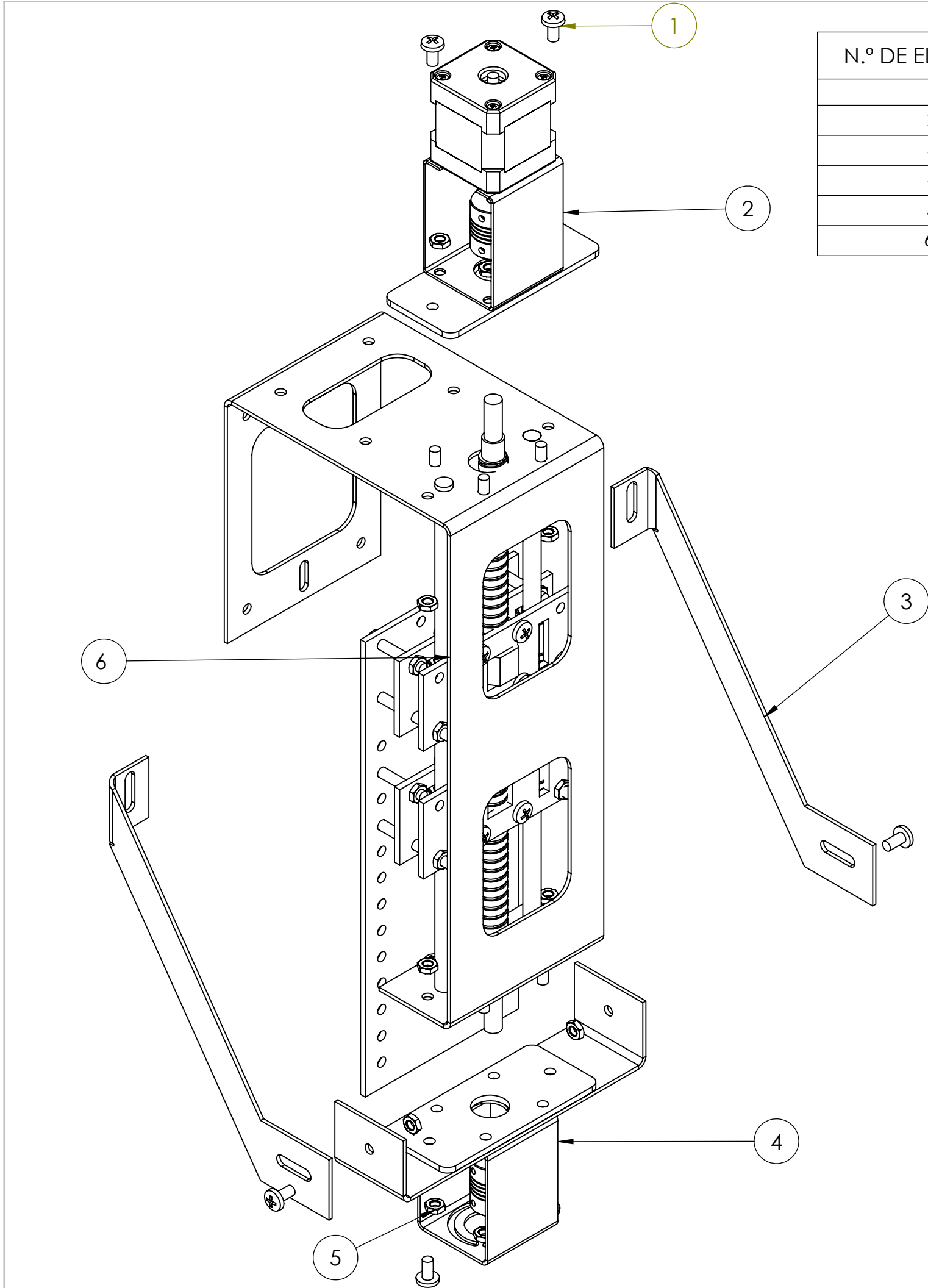
A4

Escala

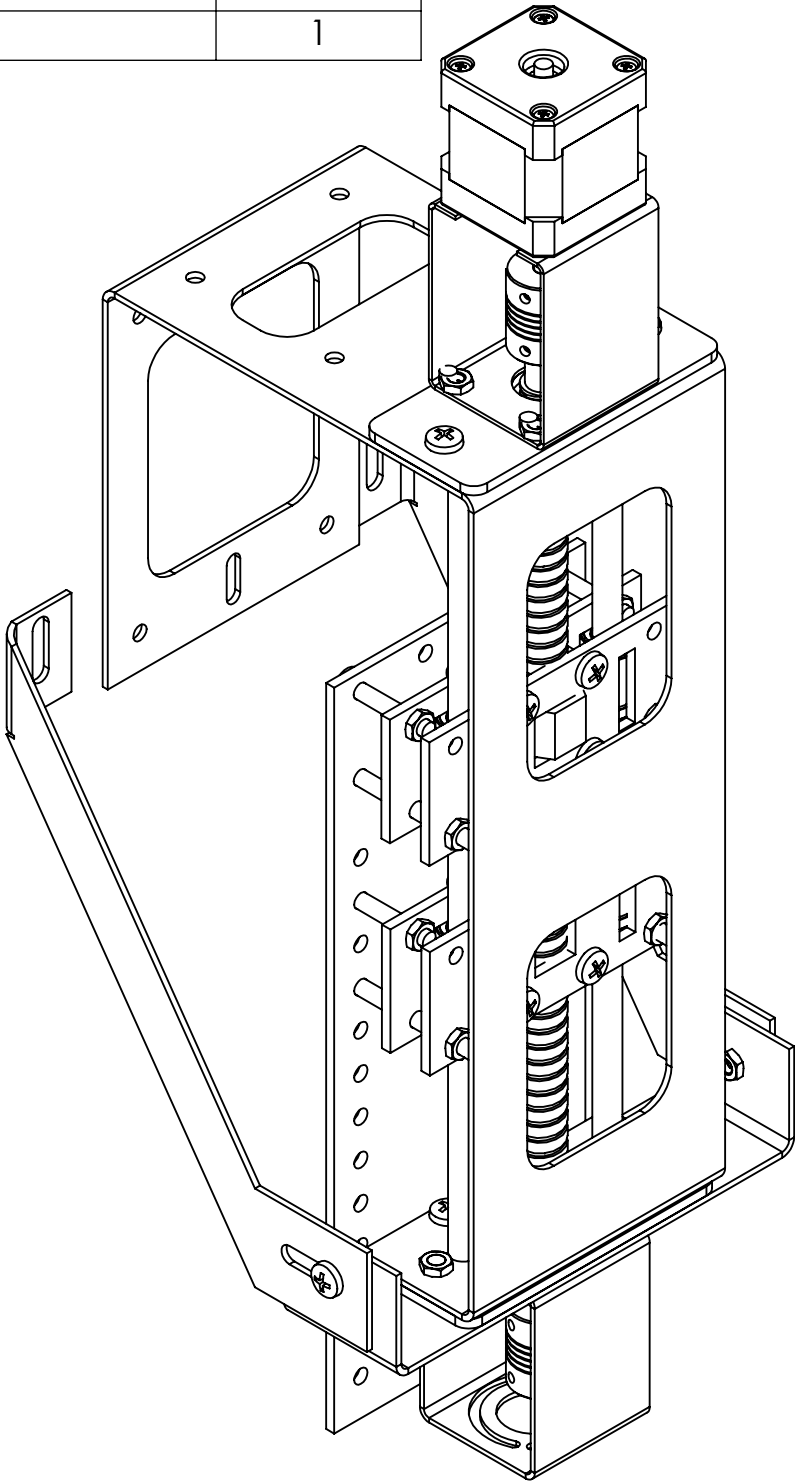
1:1



No.
Plano

9/48

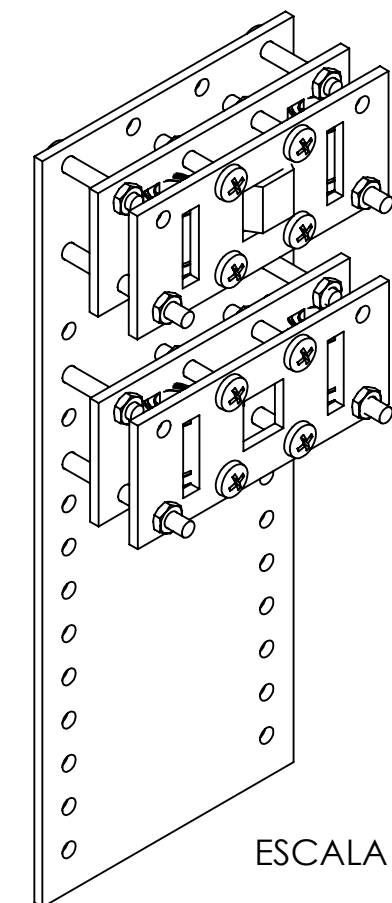
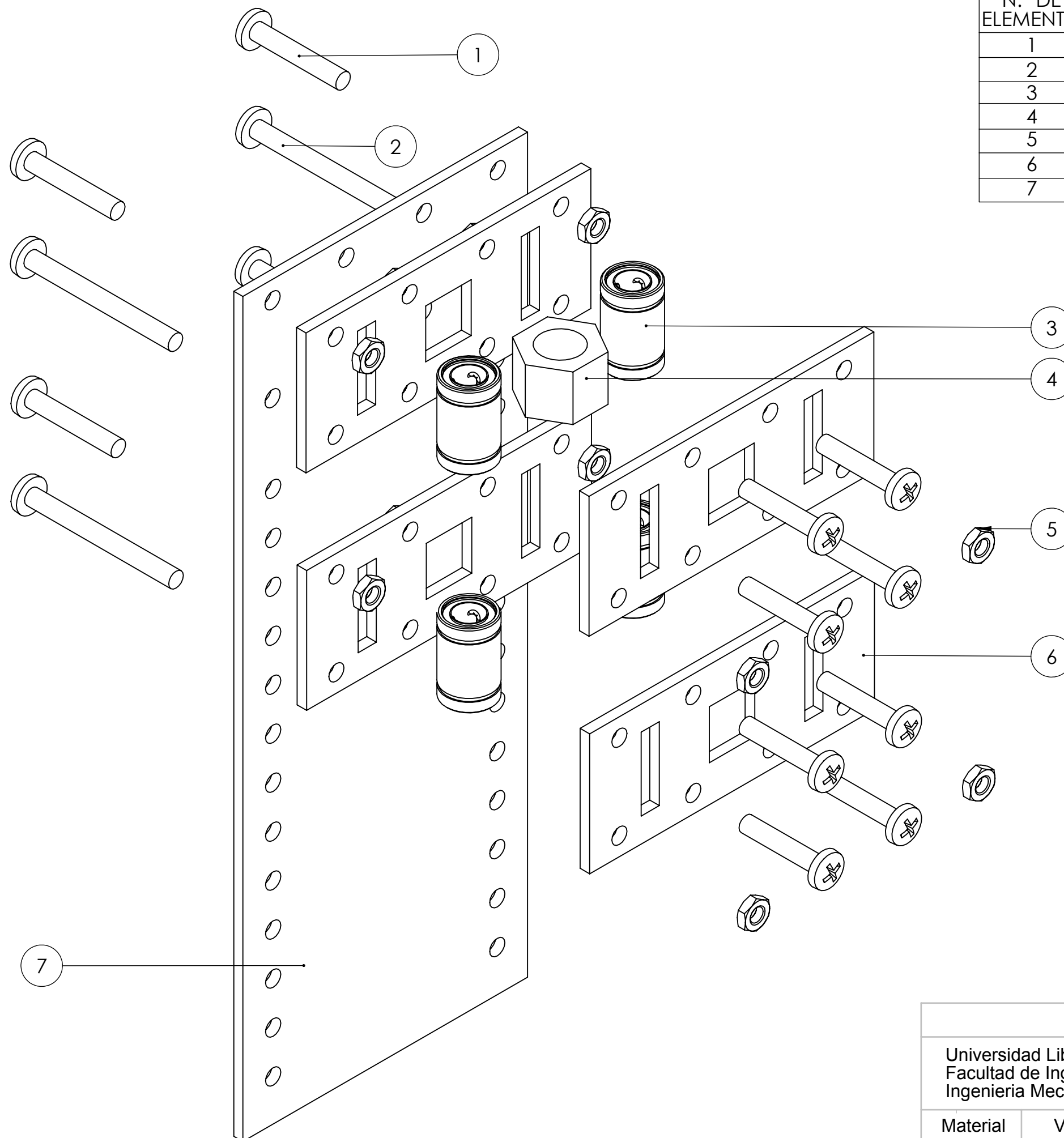


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tornillo 3/16" x 1/2"	14
2	Subconjunto Motor Eje Z	1
3	Union U Soporte Eje Z	2
4	Subconjunto Encoder Eje Z	1
5	Tuercas de Seguridad Tornillo 3/16"	14
6	Subconjunto Fijo Eje Z	1



ROBORT CARTESIANO							
Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica			Nombre Plano	Eje Z			
			Dibujó	Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017	
Material	Varios		Revisó	Ing. Aguirre	Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$		A3	Escala	1:2 No. Plano 10/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tornillo 3/16" x 1"	12
2	Tornillo 3/16" x 2"	4
3	Rodamiento Lineal 8 mm	4
4	Tuerca Varilla Roscada Perfil Cuadrado 1/2"	1
5	Tuerca Seguridad Tornillo 3/16	16
6	Soporte Tuerca-Rodamiento Eje Z	4
7	Soporte para Motor de Corte	1



ESCALA 1:2

ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Carro Eje Z

Dibujó

Cristian Rodriguez Fecha 10 Oct 2017

Material

Varios

Revisó

Ing. Aguirre Fecha 10 Oct 2017

Medidas en Milímetros Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$



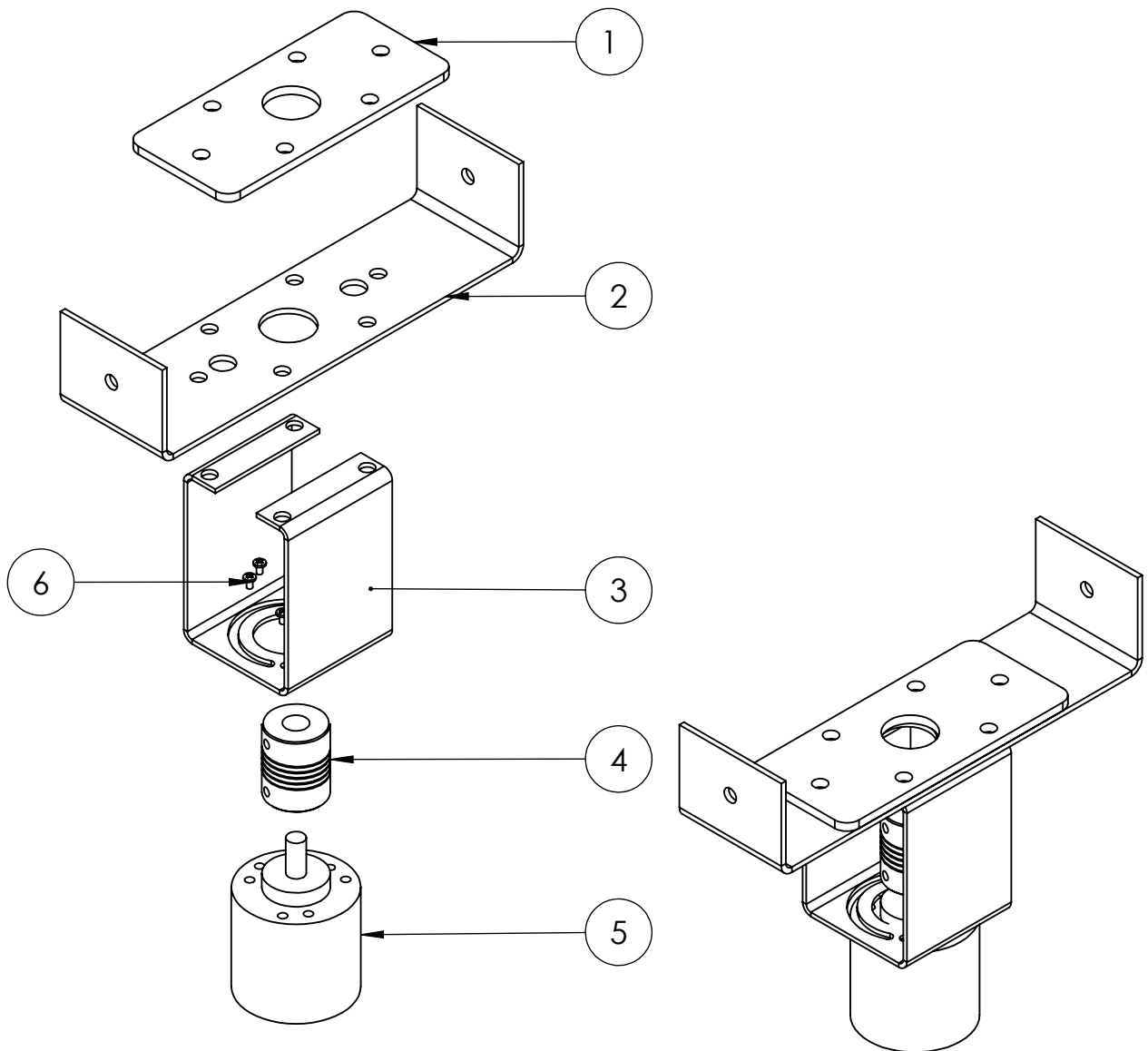
A3

Escala

1:1

No. Plano 11/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tapa Varillas	1
2	U Soporte Eje Z	1
3	Soporte Encoder Eje Z	1
4	Acople Flexible 5mm x 8 mm	1
5	Encoder	1
6	Tornillo M3	6



ROBOT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte Enconder Eje Z

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varios

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en Milímetros Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$

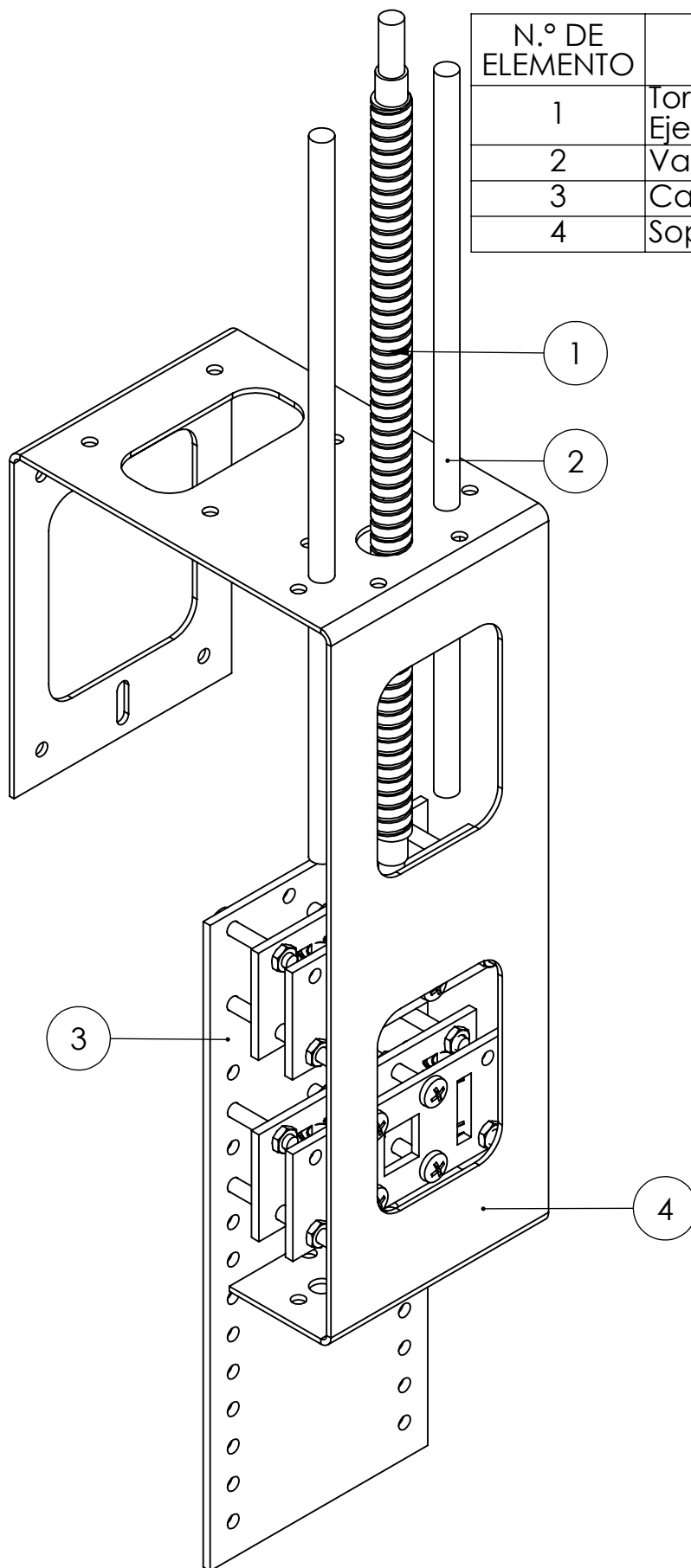


A4

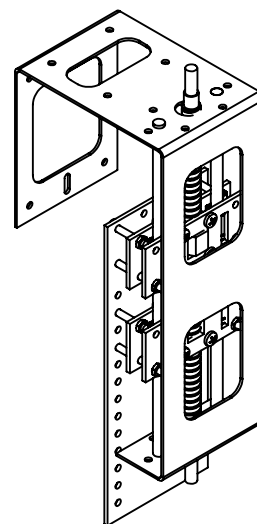
Escala

1:2

No.
Plano 12/48



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tornillo de Potencia Eje Z	1
2	Varilla Lisa Eje Z	2
3	Carro Eje Z	1
4	Soporte Eje Z	1



ESCALA 1:5

ROBOT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Subconjunto Fijo Eje Z

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varios

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

+0.1



A4

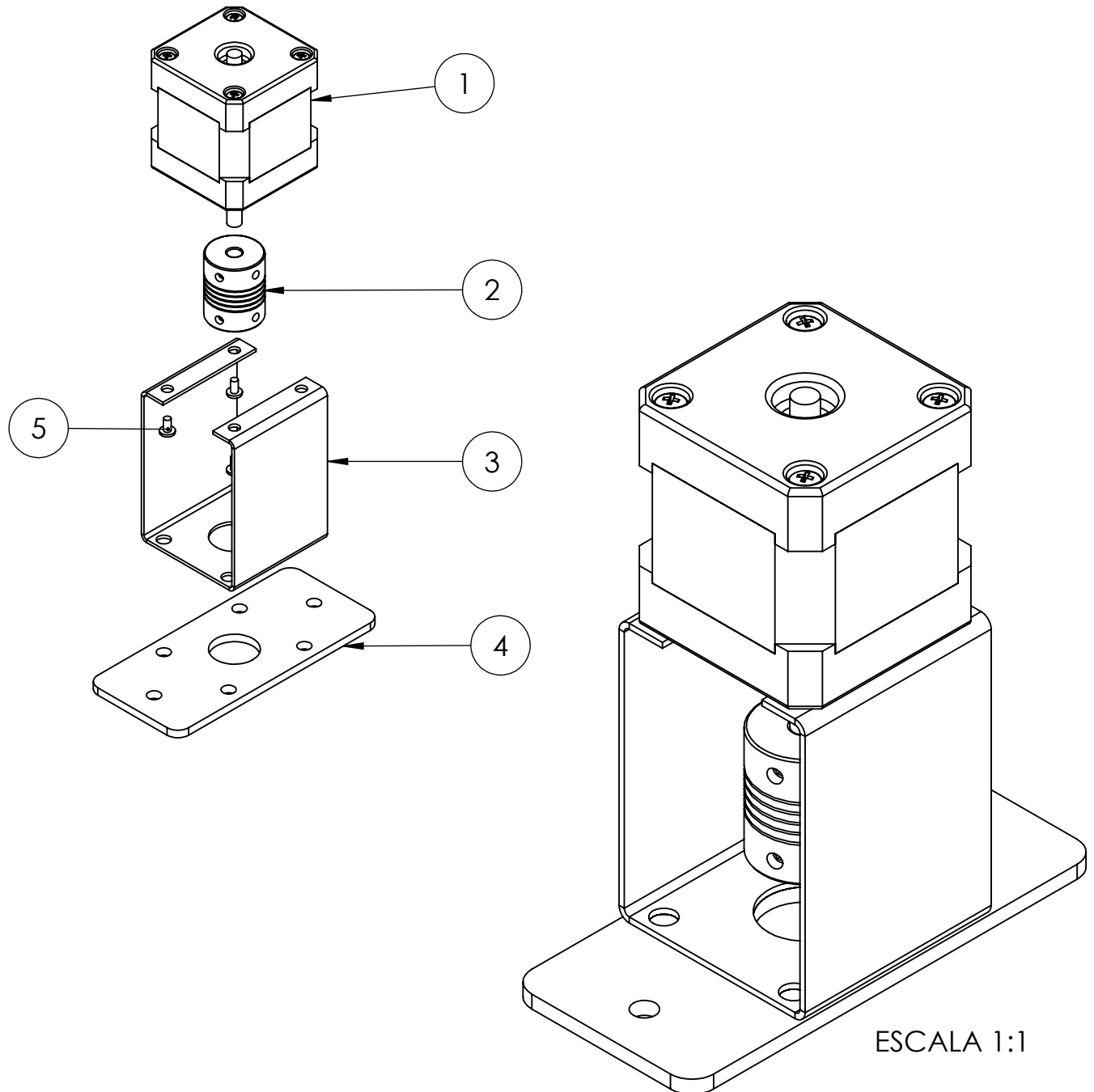
Escala

1:2

No.

Plano 13/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Motor Nema 17 HS4401	1
2	Acople Flexible 5mm x 8 mm	1
3	Soporte Motor Eje Z	1
4	Tapa Varillas	1
5	Tornillo M3	4



ROBOT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte Motor Eje Z

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varios

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en Milímetros

Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$



A4

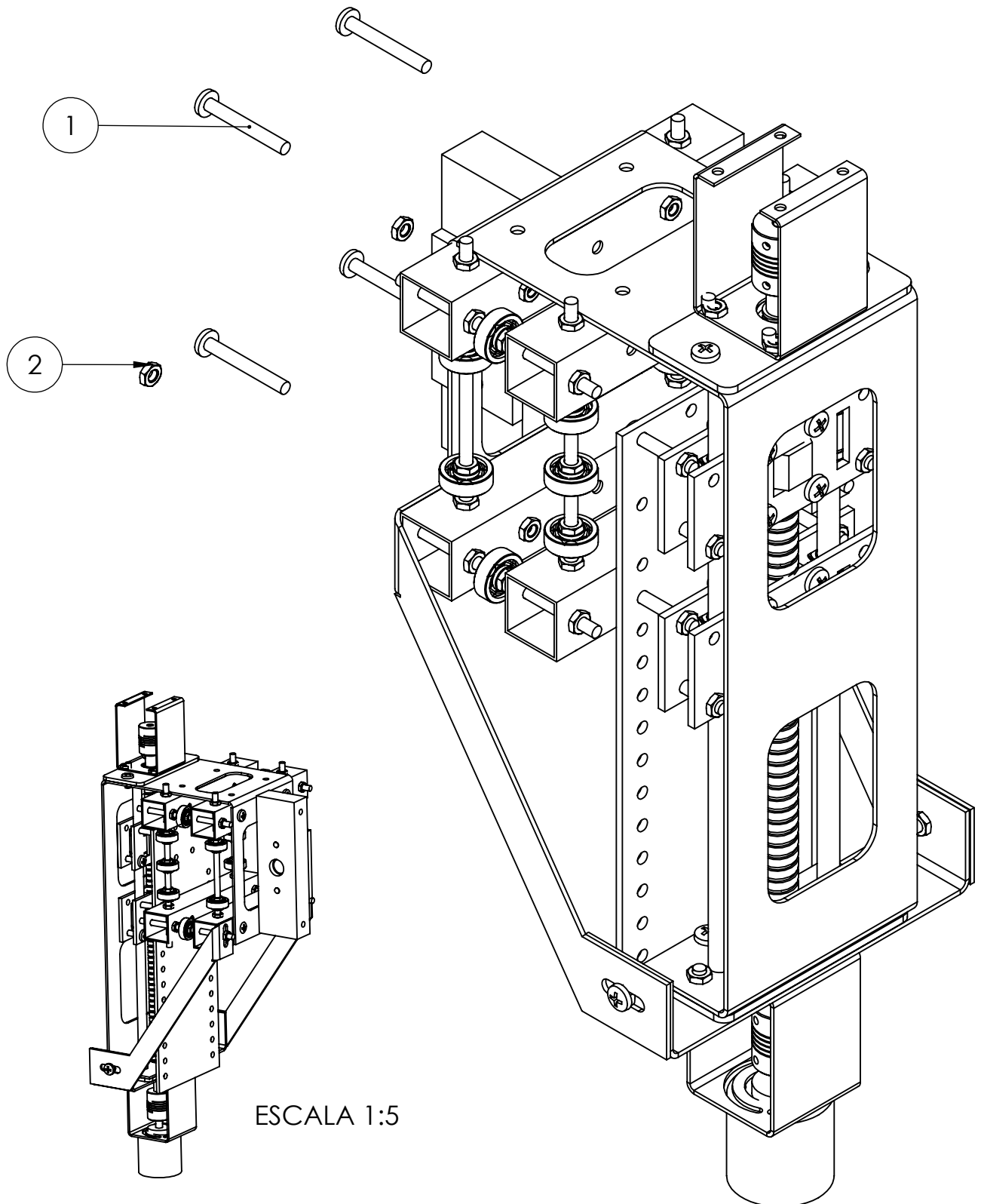
Escala

1:2



No.
Plano

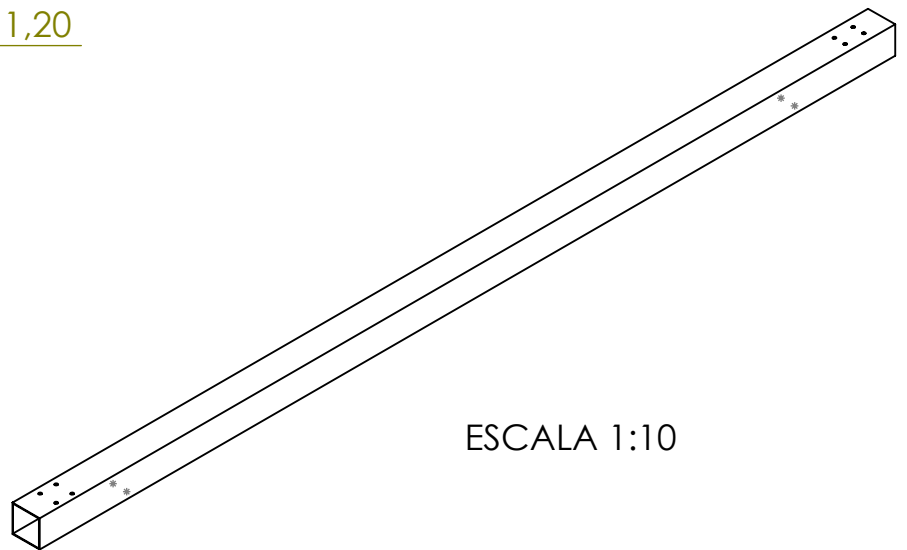
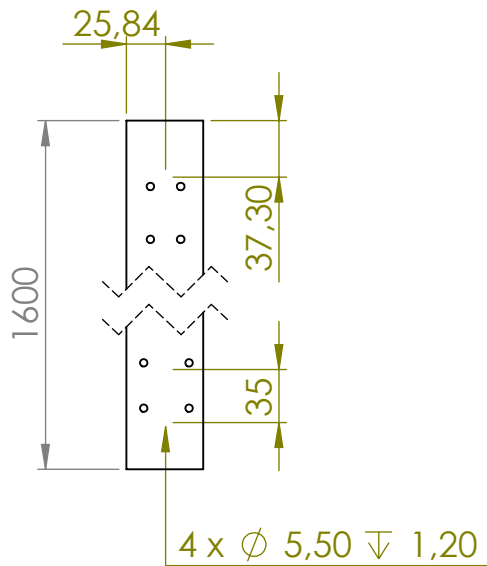
14/48

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tornillo 3/16" x 1 1/2"	4
2	Tuerca de Seguridad Tornillo 3/16"	2

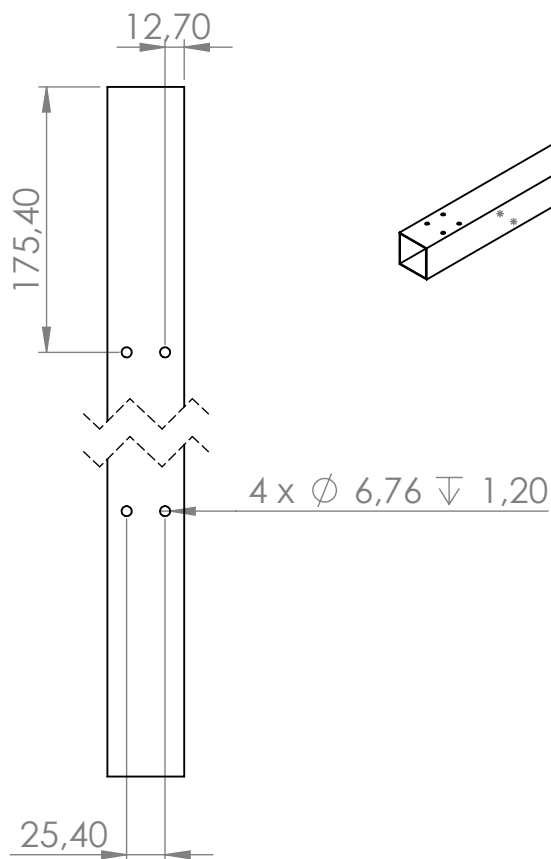


ROBOT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica				Nombre Plano	Ensamblaje Carro Eje Y Con Eje Z			
				Dibujó	Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017	
Material	Varios			Revisó	Ing. Aguirre	Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$		A4	Escala	1:2	No. Plano 15/48



ESCALA 1:10



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Perfil eje X

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Perfil Aluminio 6063
cuadrado 2"

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 0.1$



A3

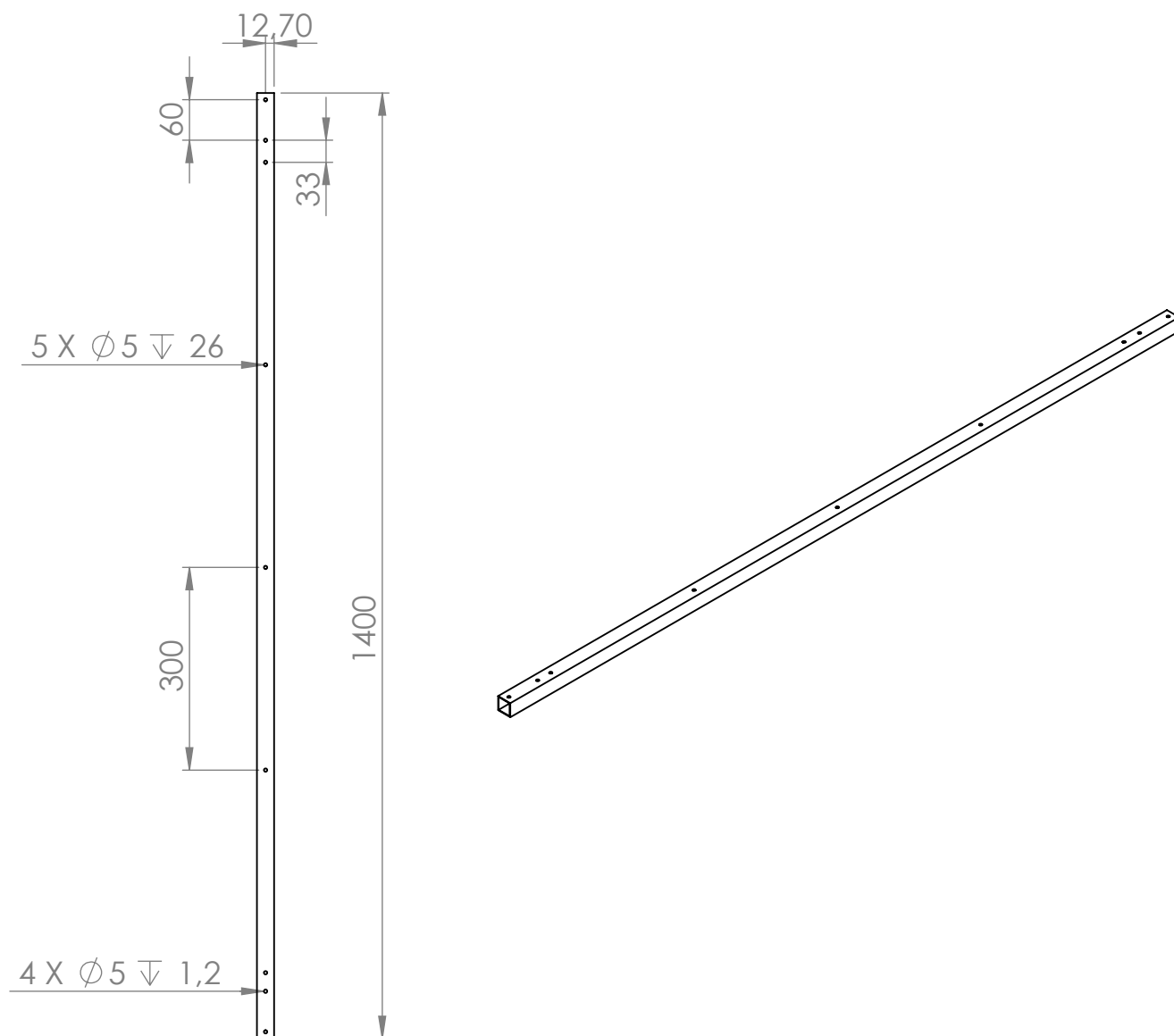
Escala

1:5


No.

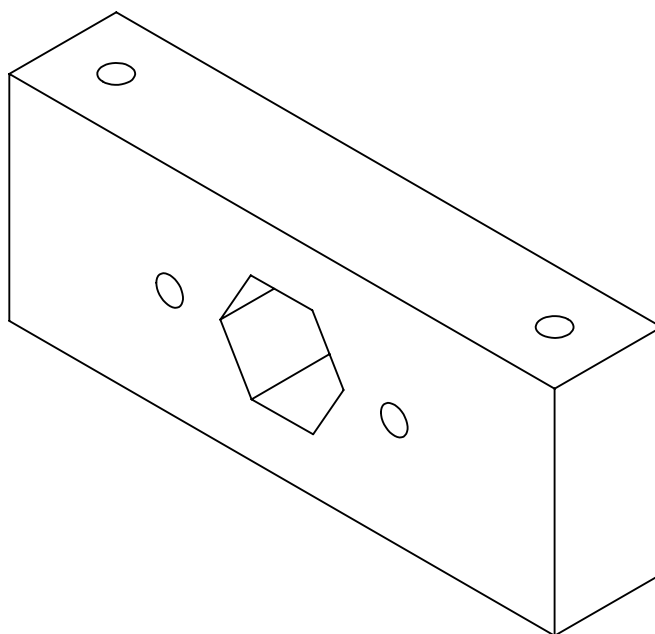
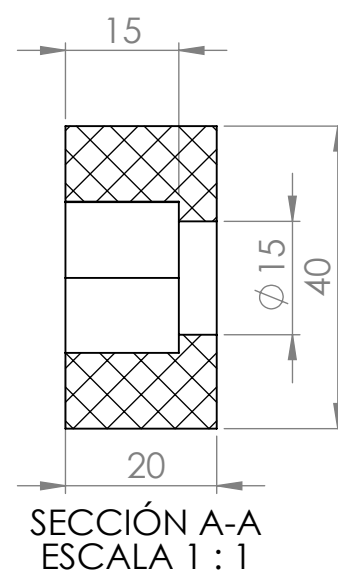
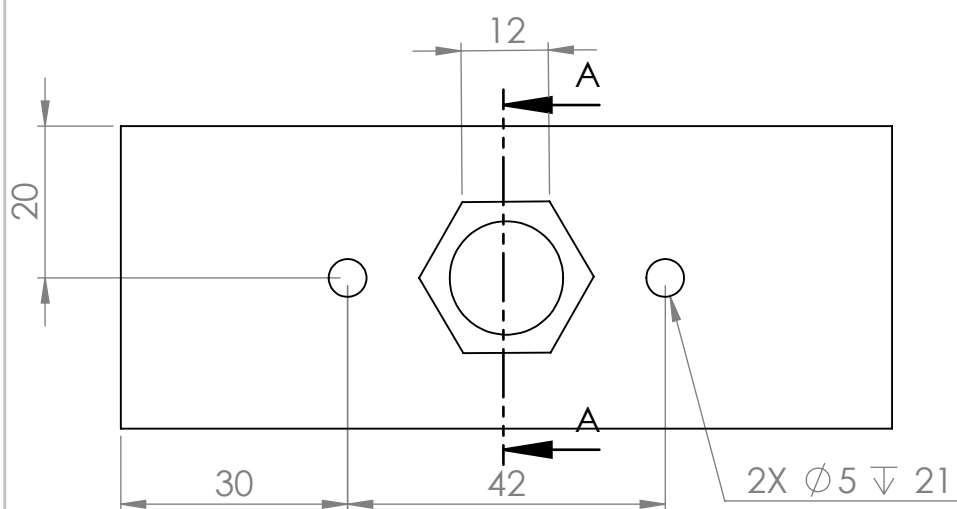
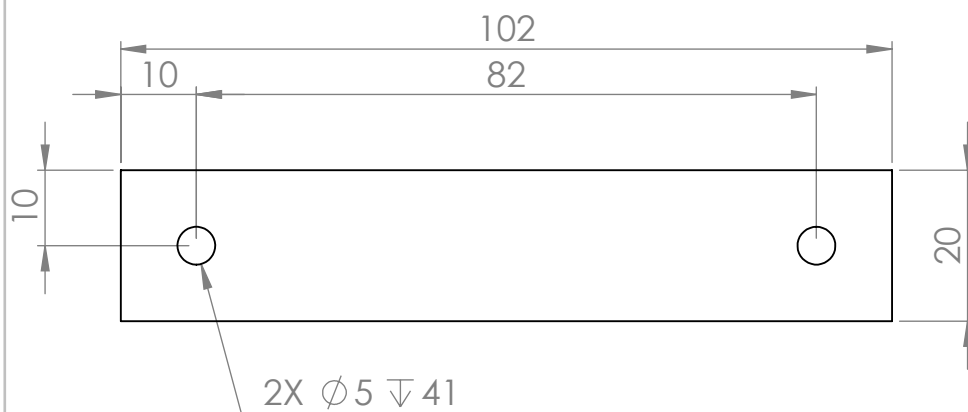
Plano

16/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica					Nombre Plano		Anclaje a Mesa					
					Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017			
Material		Perfil Aluminio 6063 Cuadrado 1"			Revisó		Ing. Aguirre		Fecha	10 Oct 2017		
Medidas en		Milímetros	Tolerancia	$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$			A4	Escala	1:10	No. Plano	17/48	



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Camisa 1 Eje X

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina de Nylon de
20 mm

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1



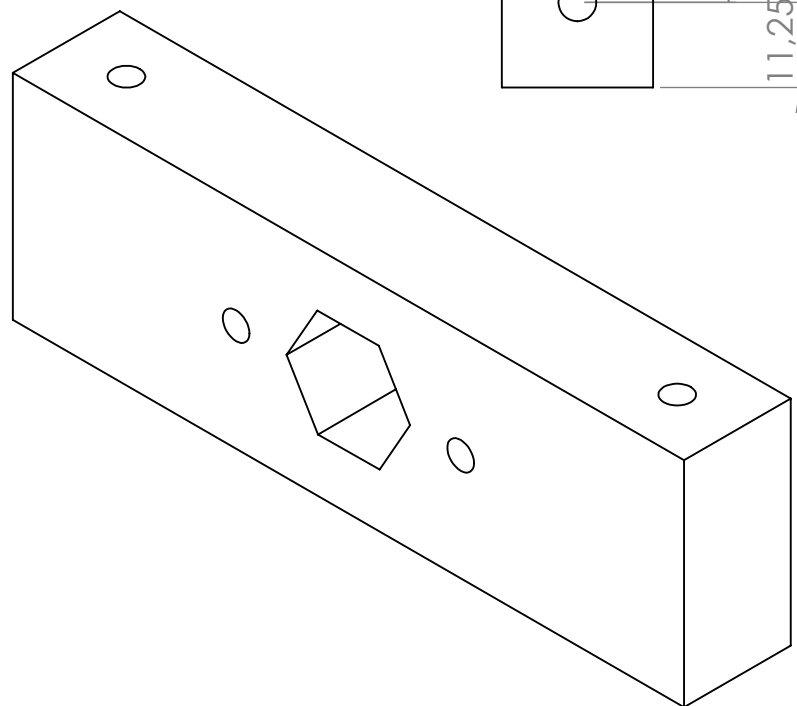
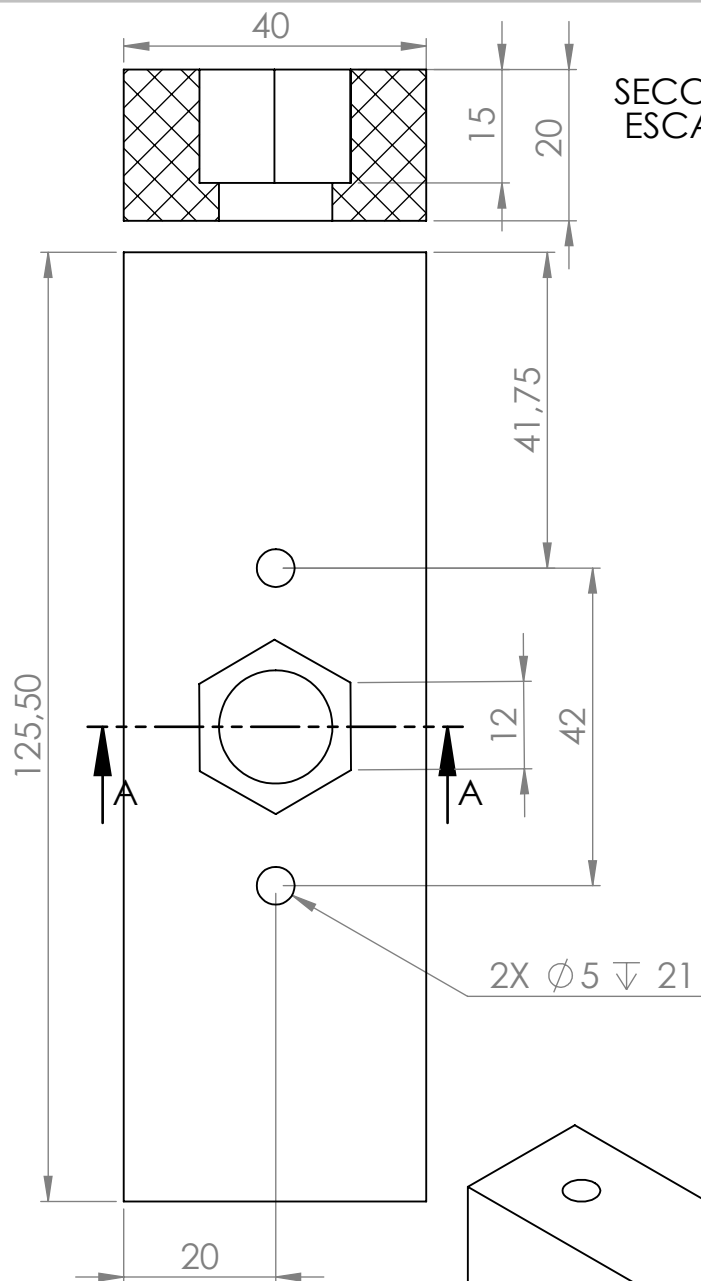
A4

Escala

1:1

No.

Plano 18/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Camisa 1 eje Y

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina de Nylon de
20 mm

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1

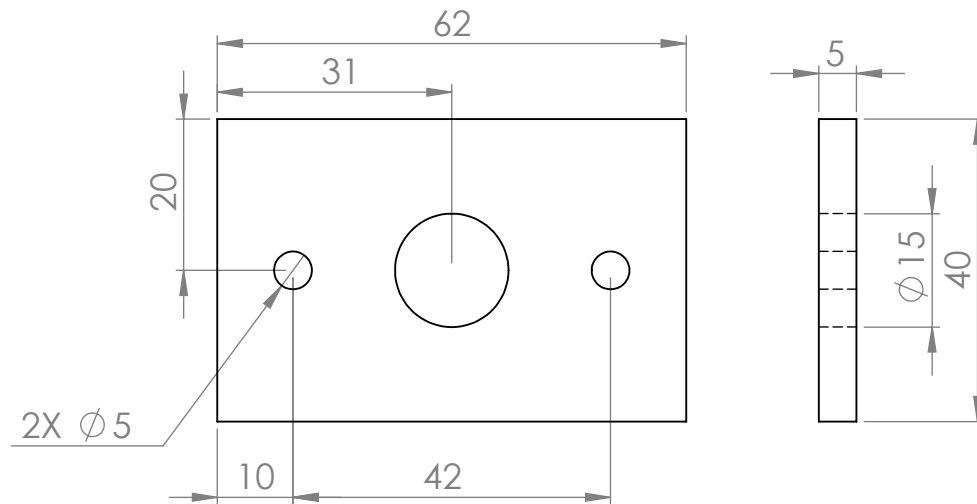


A4

Escala

1:1

No.
Plano 19/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Camisa 2 eje X

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina de Nylon de
5 mm

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1

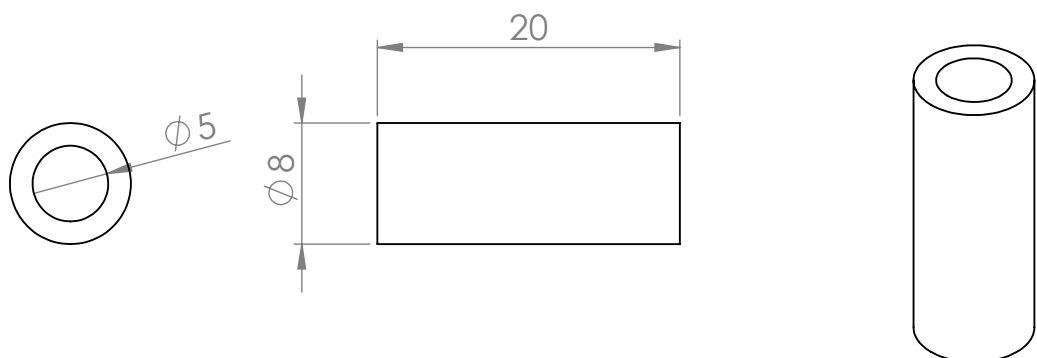


A5

Escala

1:1

No.
Plano 20/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Bujes para Soportes

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Aluminio 6063

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1

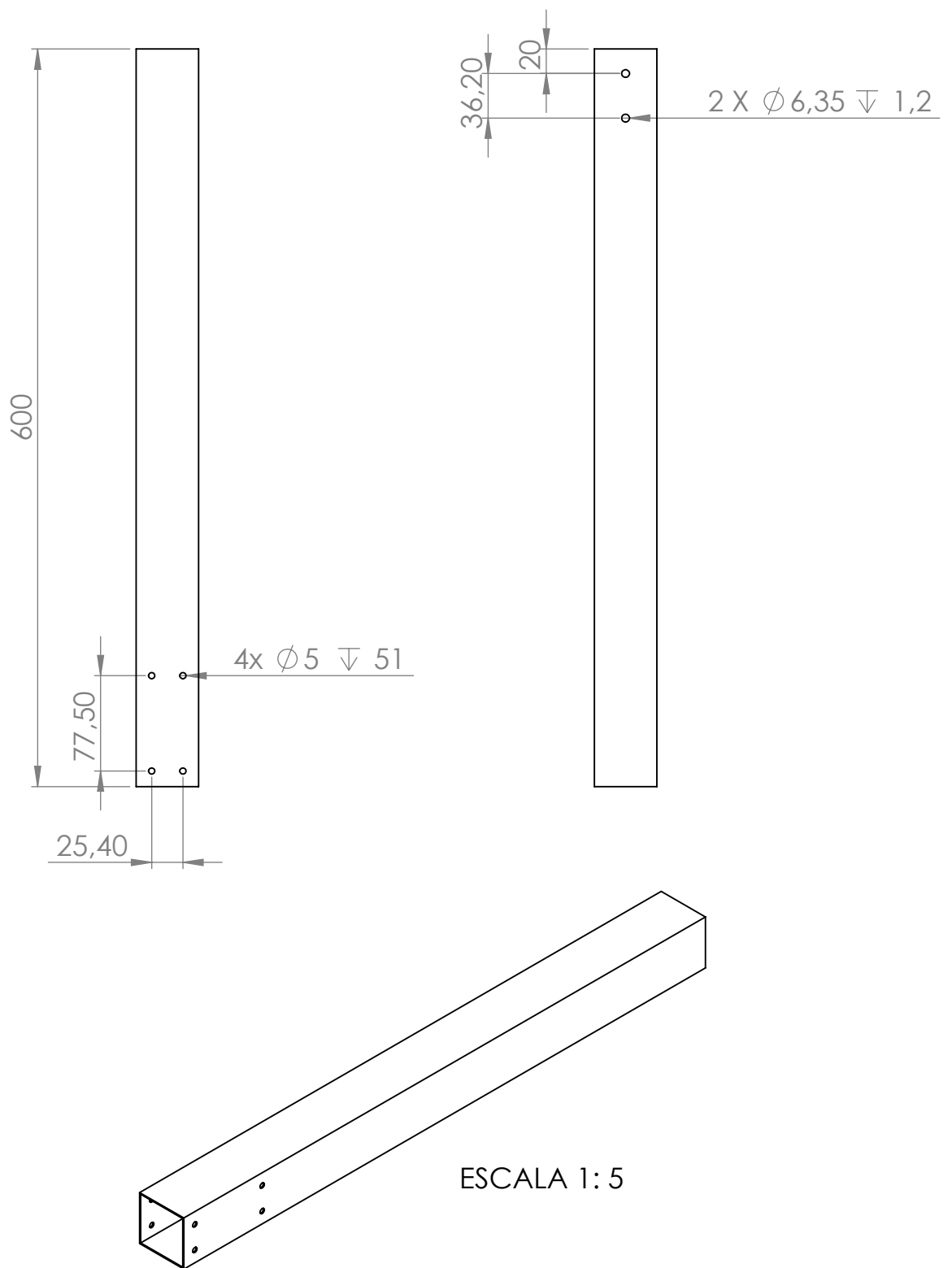


A5

Escala

2:1

No.
Plano 21/48



ROBERT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Columna union eje X con eje Y

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Perfil Aluminio 6063
cuadrado 2"

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

+ 0.1
- 0.1



A4

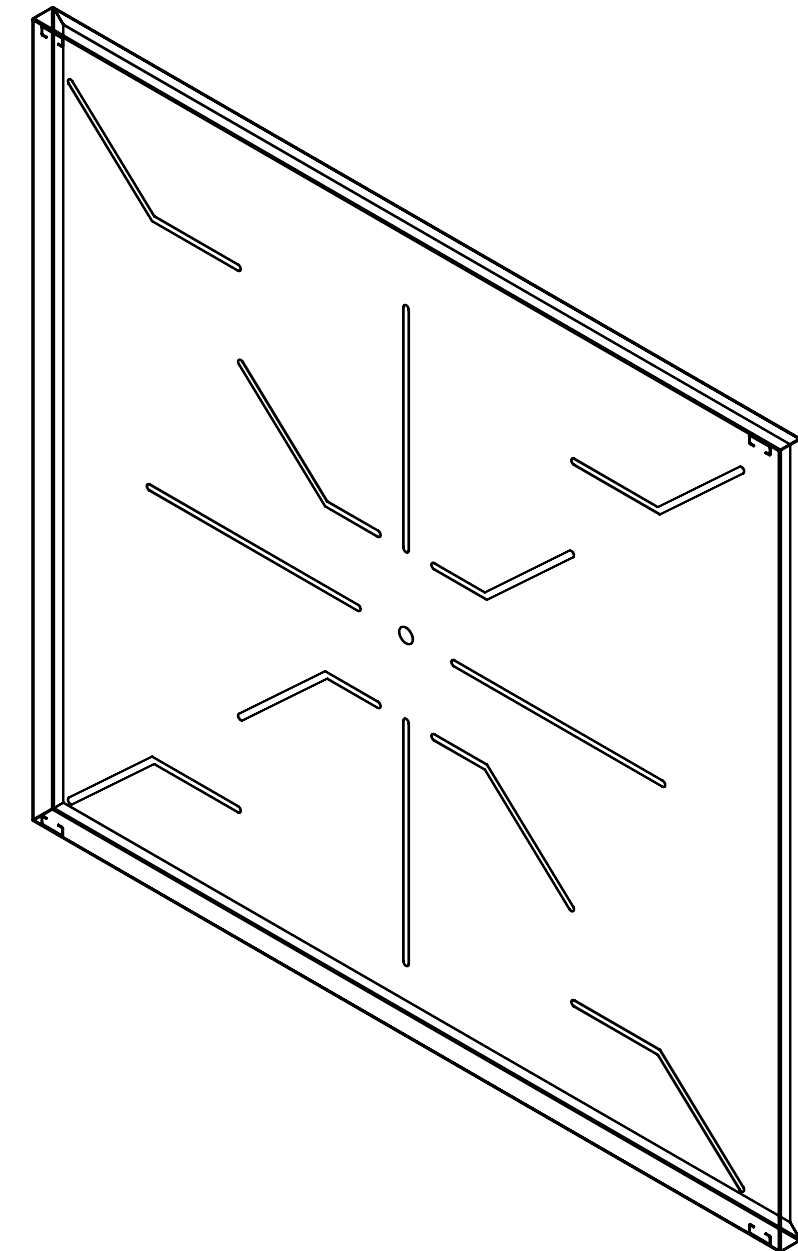
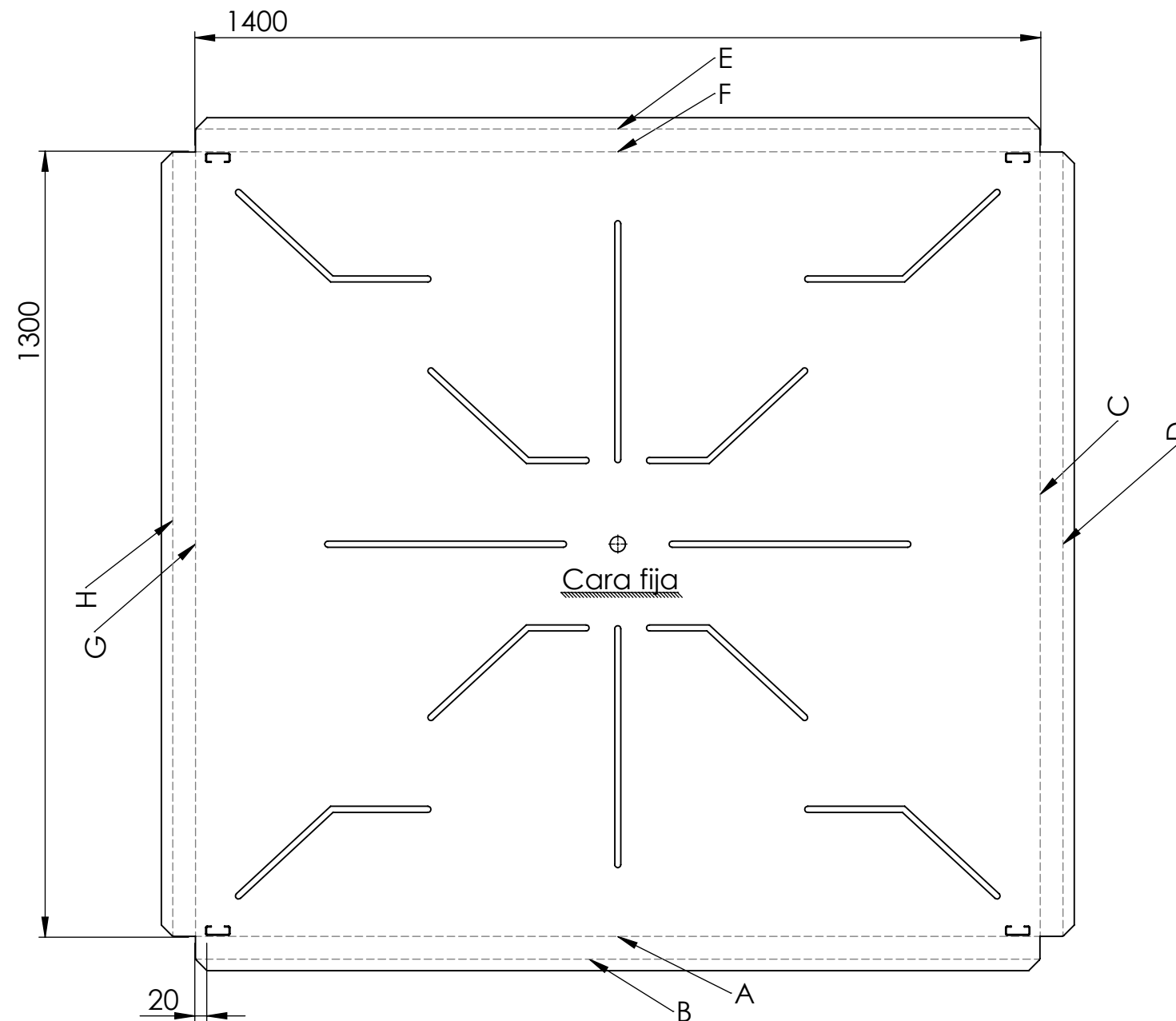
Escala

1:5

No.
Plano

22/48

Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ABAJO	90°	1.15
B	HACIA ABAJO	90°	1.15
C	HACIA ABAJO	90°	1.15
D	HACIA ABAJO	90°	1.15
E	HACIA ABAJO	90°	1.15
F	HACIA ABAJO	90°	1.15
G	HACIA ABAJO	90°	1.15
H	HACIA ABAJO	90°	1.15



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Desarrollo mesa

Dibujó

Cristian Rodriguez Fecha 10 Oct 2017

Material Lamina CR calibre 16

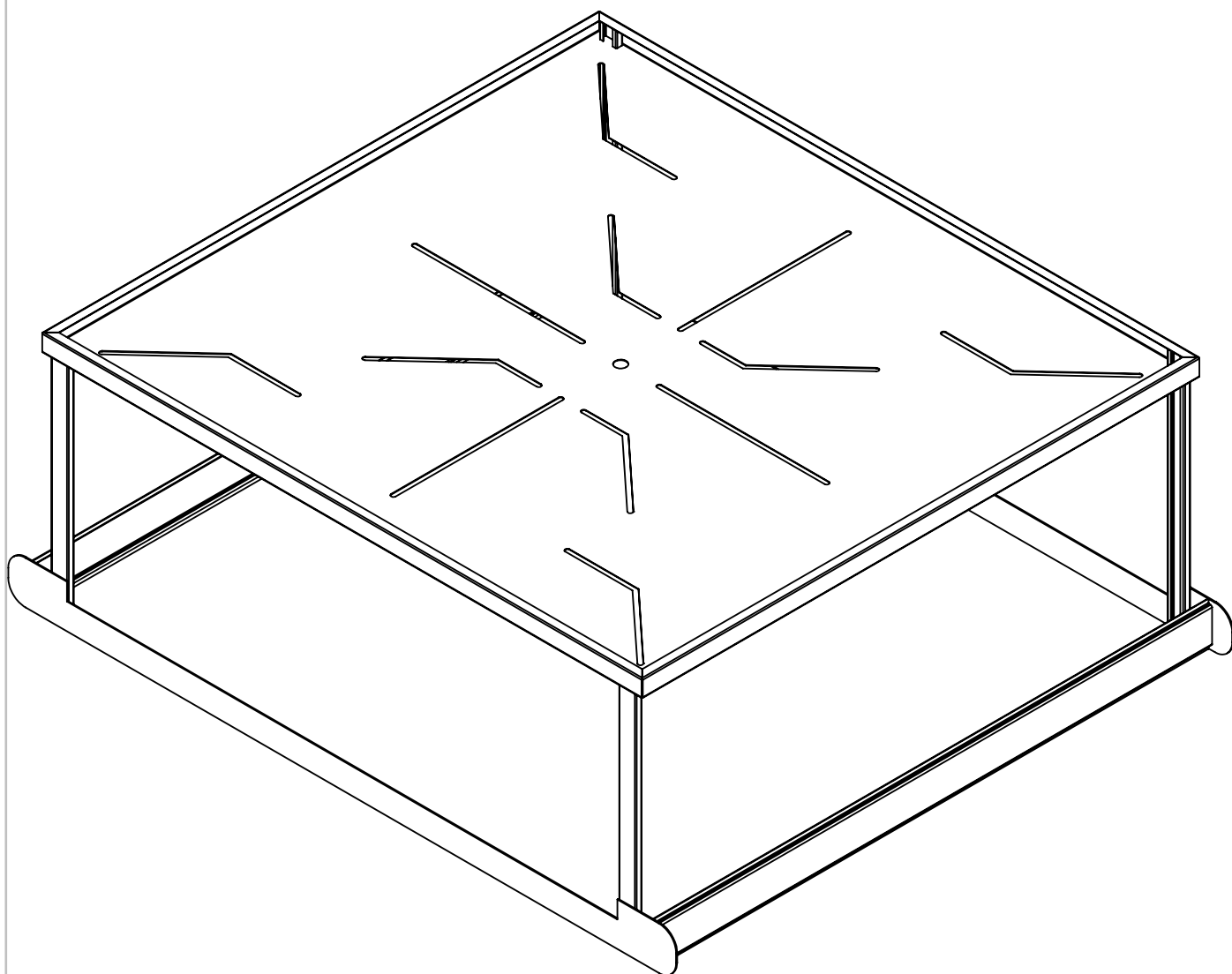
Revisó

Ing. Aguirre Fecha 10 Oct 2017



Medidas en Milímetros Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$

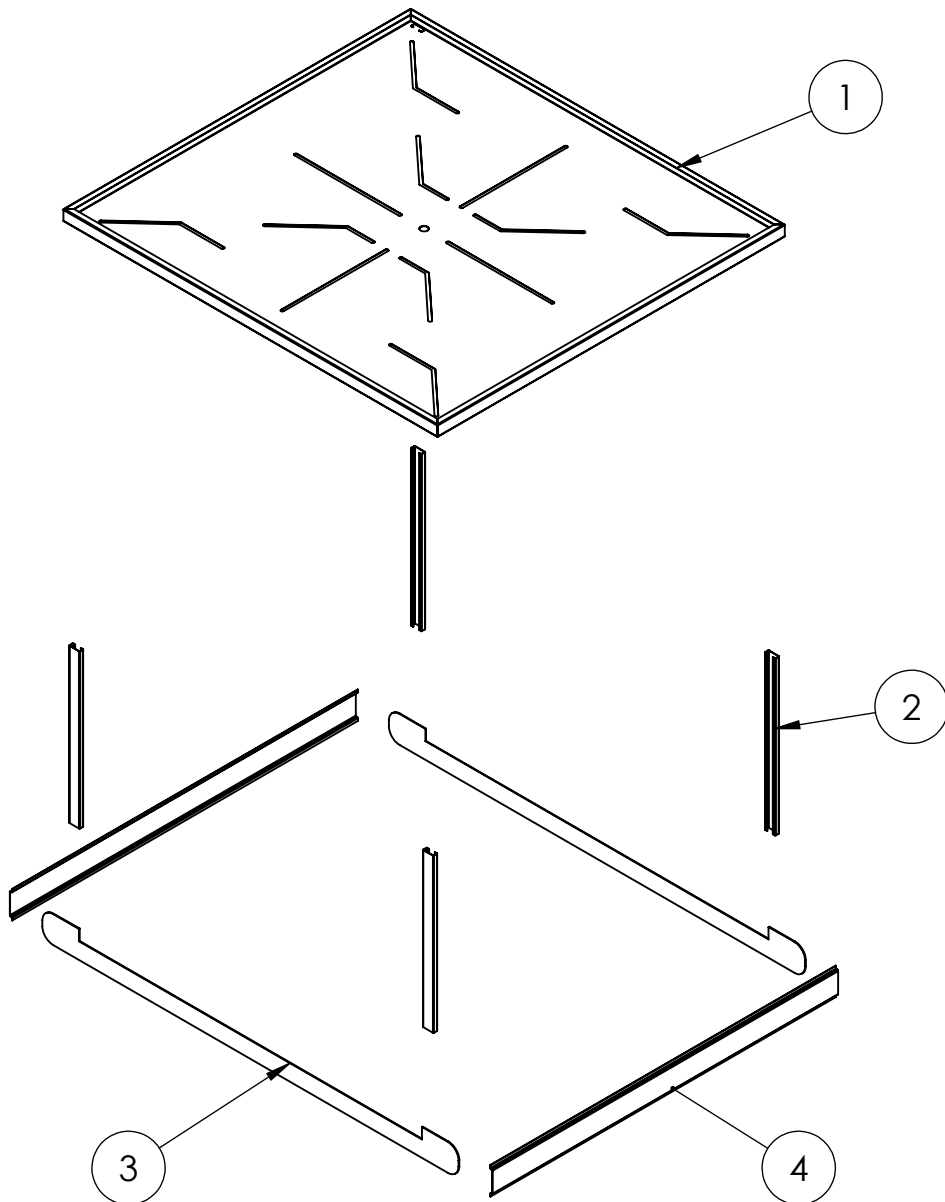


A3 Escala 1:5 No. Plano 23/48



ROBORT CARTESIANO

ROBORT CARTESIANO									
Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingenieria Mecánica			Nombre Plano		Ensamble subconjunto mesa				
			Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017		
Material	Lamina CR Calibre 16		Revisó		Ing. Aguirre		Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$		A3	Escala	1:10	No. Plano	24/48



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Mesa	1
2	Soporte vertical	4
3	Soporte frontal	2
4	Soporte lateral	2

ROBOT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Explosión subconjunto mesa

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR Calibre 16

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en Milímetros Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$

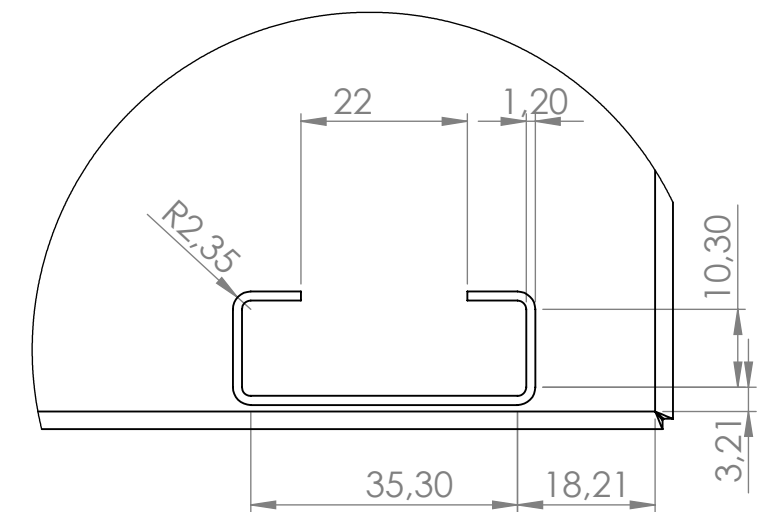
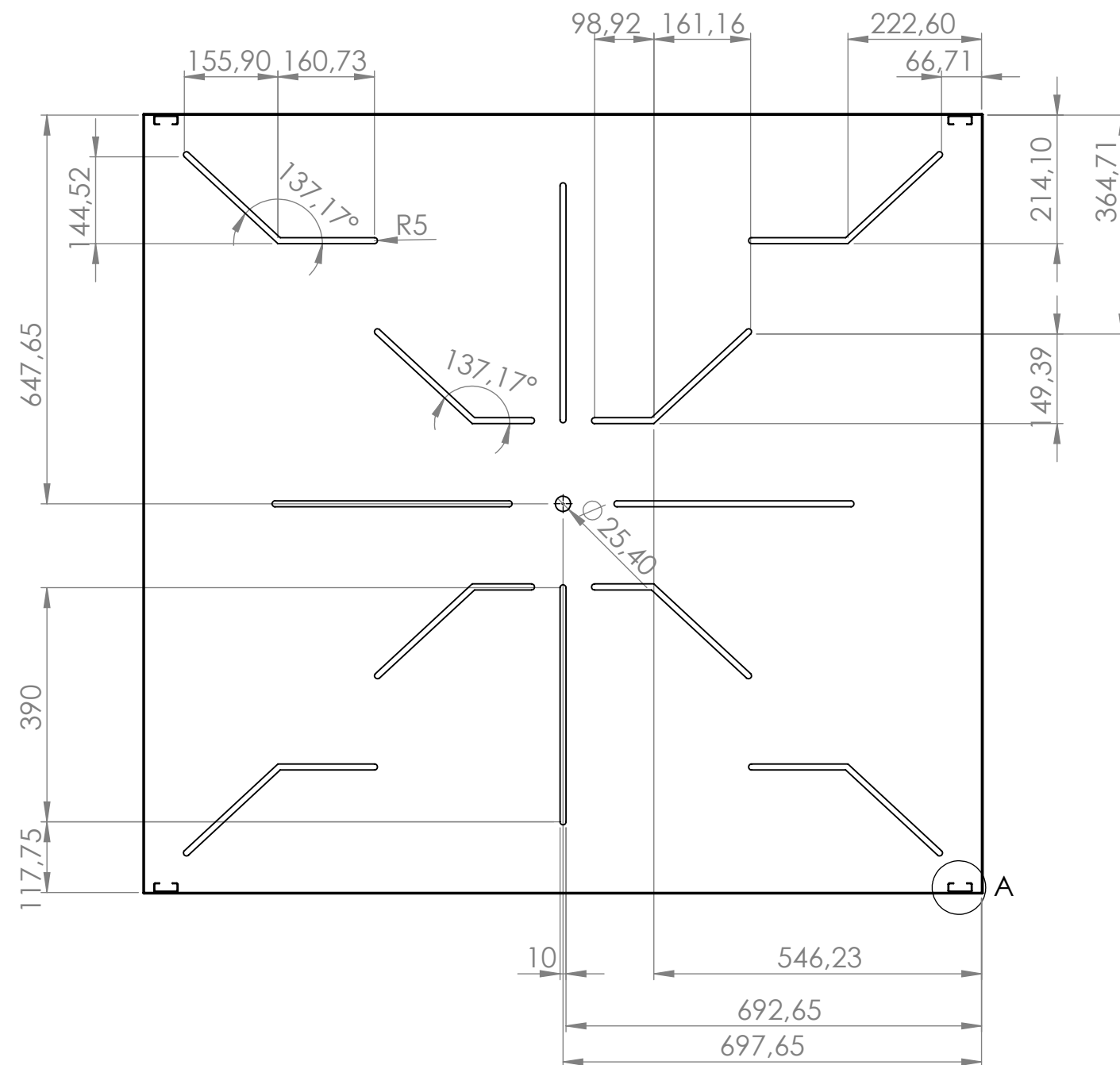


A3

Escala



1:20

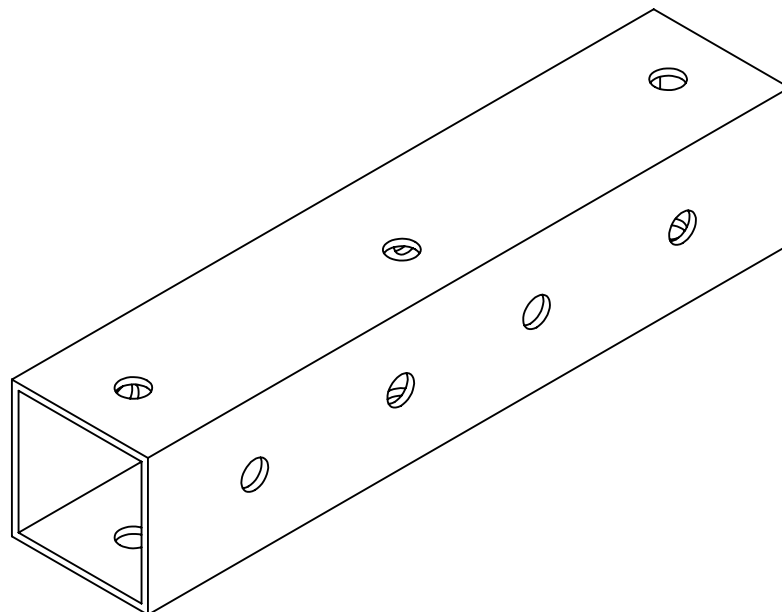
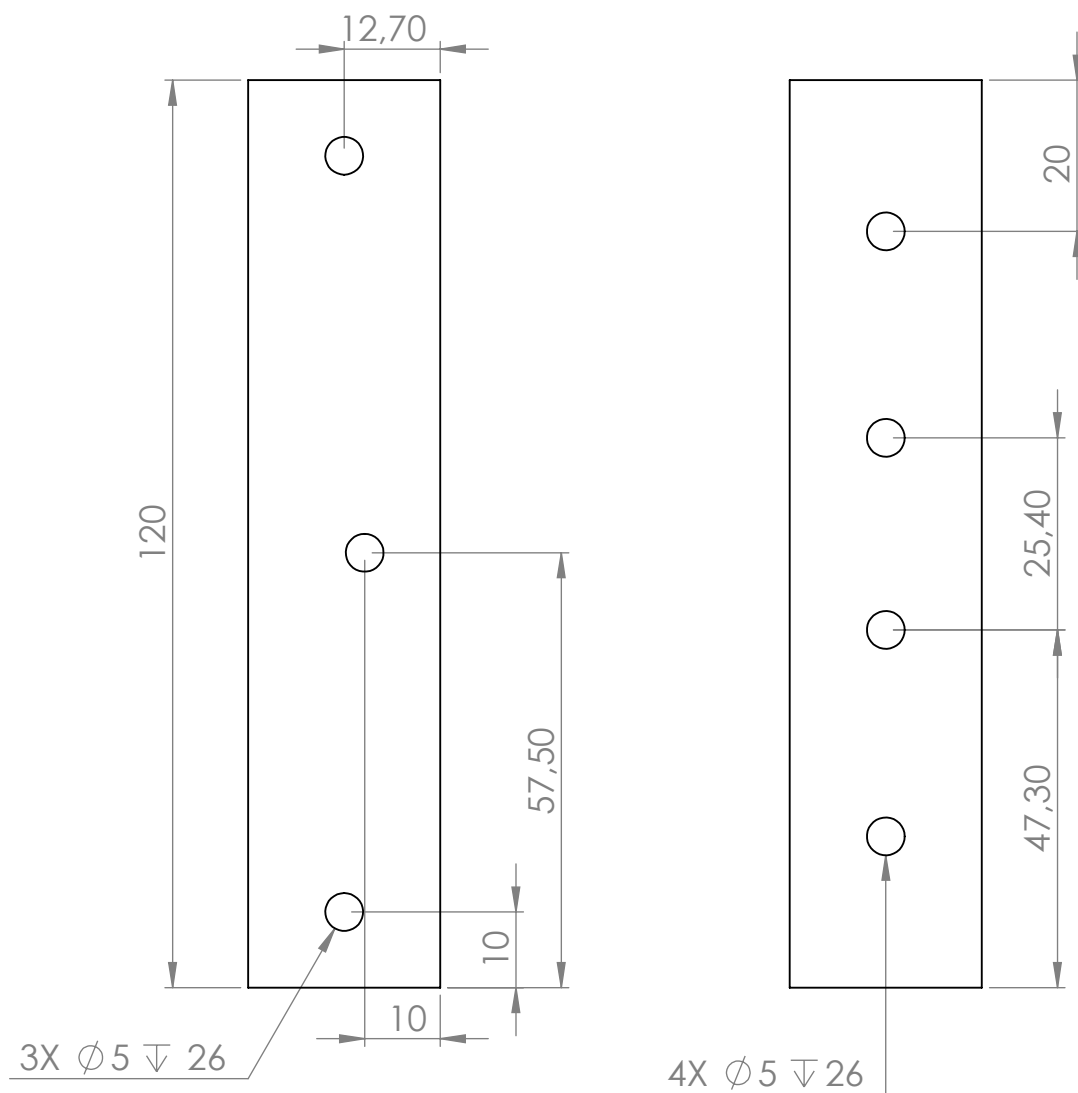
No. Plano 25/48





DETALLE A
ESCALA 1 : 1 X 4

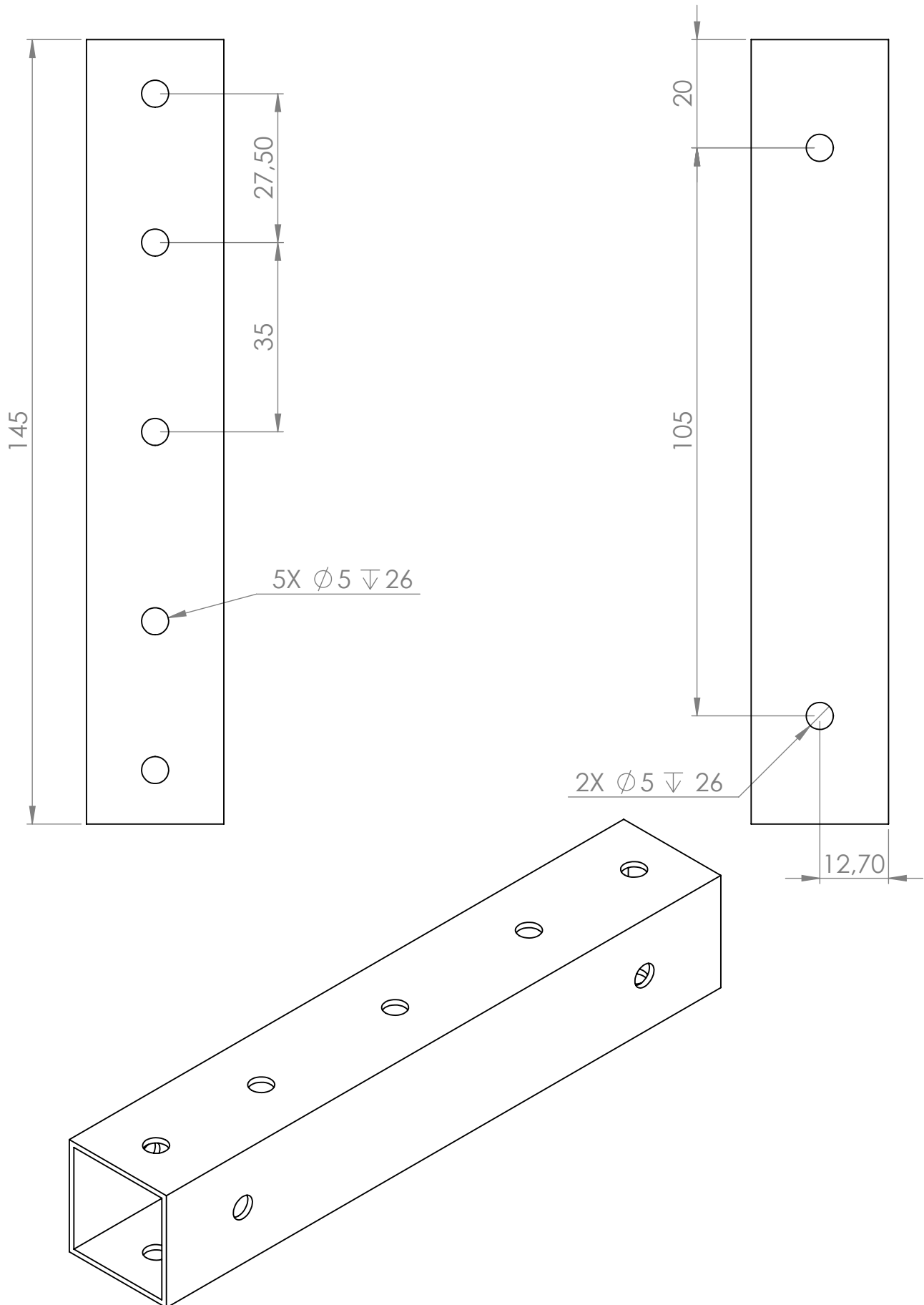
ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica					Nombre Plano		Mesa		
					Dibujó	Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017	
Material	Lamina CR calibre 16				Revisó	Ing. Aguirre	Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$		A3	Escala	1:10	No. Plano	26/48



ROBERT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica				Nombre Plano	Perfil Carros ejes X			
				Dibujó	Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017	
Material	Perfil Aluminio 6063 cuadrado 1"			Revisó	Ing. Aguirre	Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	+0.1 -0.1		A4	Escala	1:1	No. Plano 27/48



ROBERT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Perfil carros eje Y

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Perfil Aluminio 6063
cuadrado 1"

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$

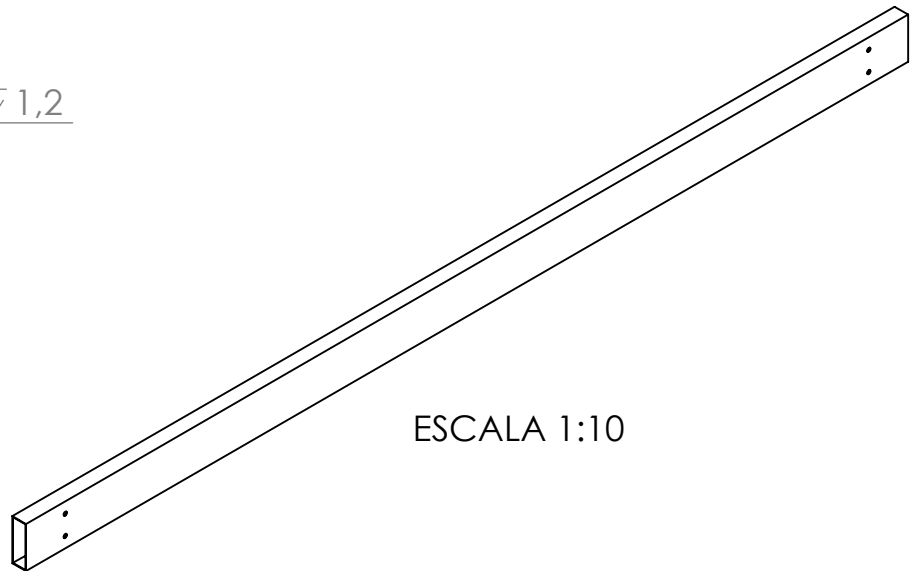
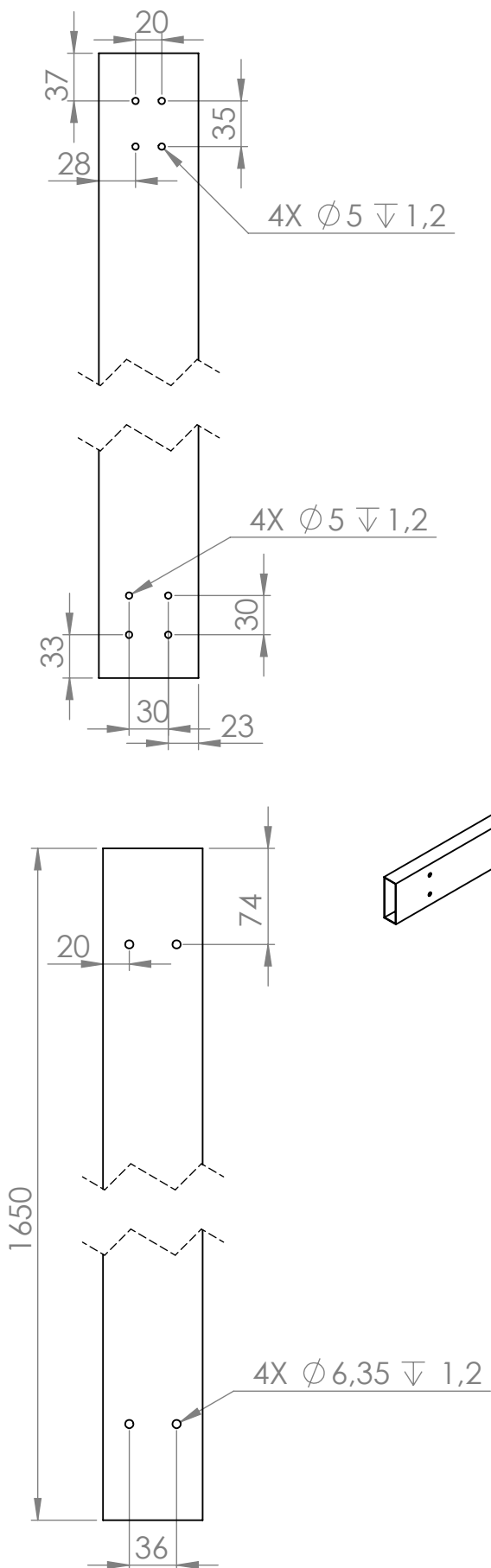


A4

Escala



1:1

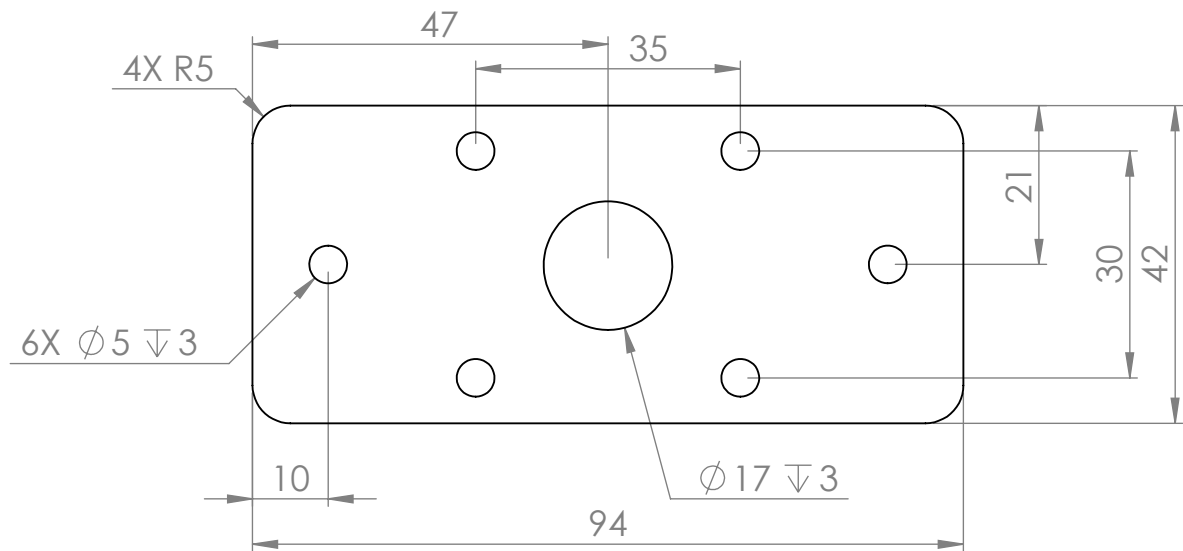
No.
Plano 28/48



ESCALA 1:10

ROBERT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica				Nombre Plano	Perfil Eje Y			
				Dibujó	Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017	
Material	Perfil Aluminio 6063 rectangula 3" x 1"			Revisó	Ing. Aguirre	Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	+0.1 -0.1		A4	Escala	1:5	No. Plano 29/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Tapa Varillas Eje Z

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 12

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1



A5

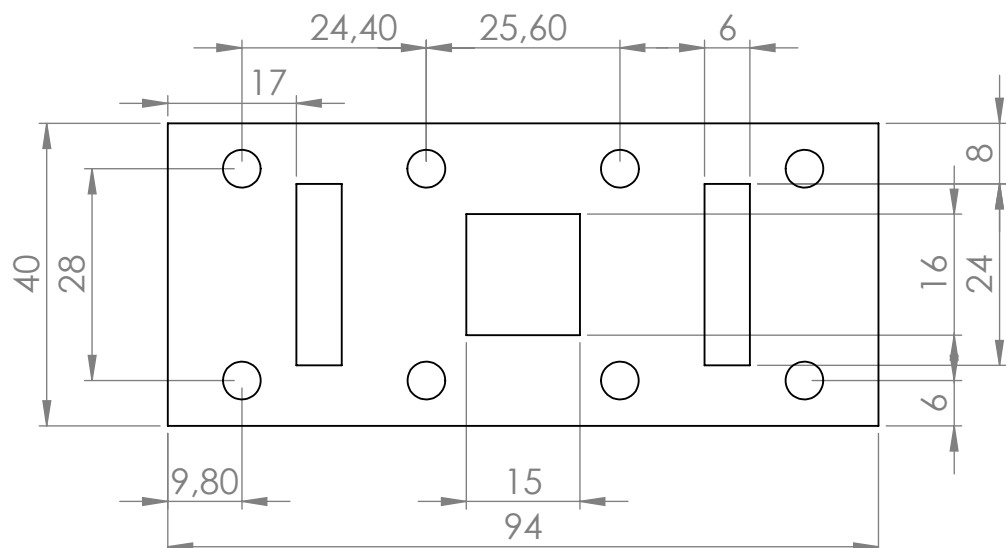
Escala

1:1

No.

Plano

30/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte Tuerca-Rodamiento Eje Z

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 12

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1



A5

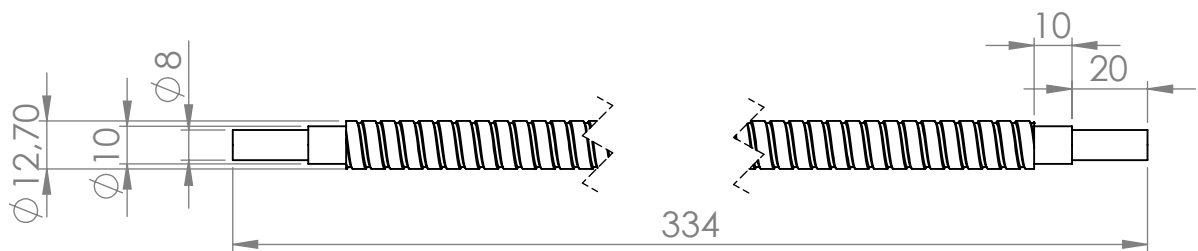
Escala

1:1

No.

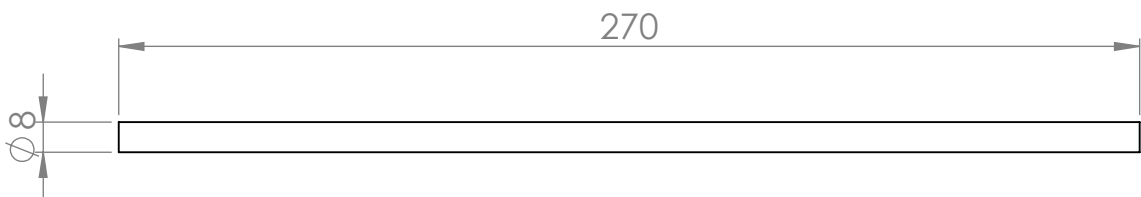
Plano

31/48



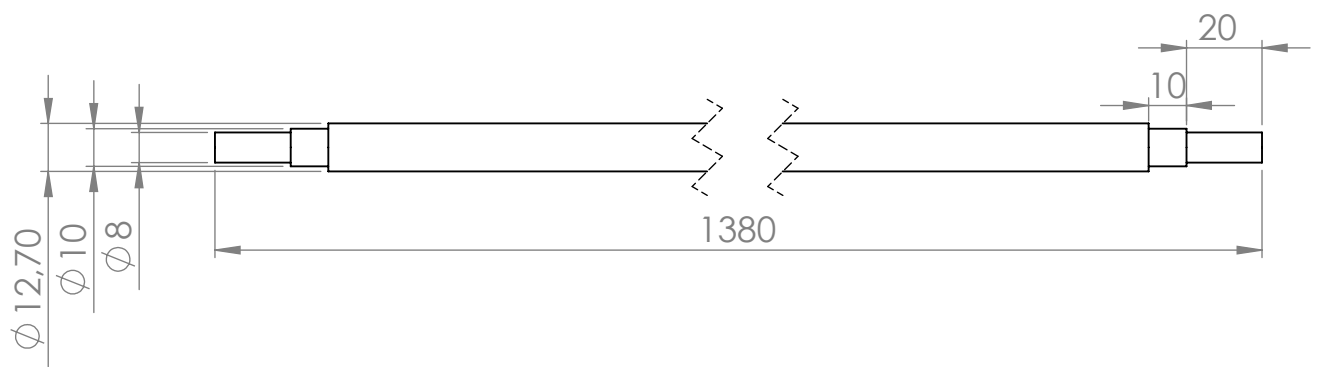
ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica				Nombre Plano		Tornillo Potencia Eje Z				
				Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017		
Material	Varilla roscada perfil cuadrado			Revisó		Ing. Aguirre		Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$			A5	Escala	1:2	No. Plano	32/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica					Nombre Plano		Varilla Lisa Eje Z				
					Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017		
Material		Varilla Acero Plata			Revisó		Ing. Aguirre		Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en		Milímetros	Tolerancia	$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$		A5	Escala		1:5	No. Plano	33/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Tornillo Potencia Eje X

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varilla Roscada
Perfil Cuadrado

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1



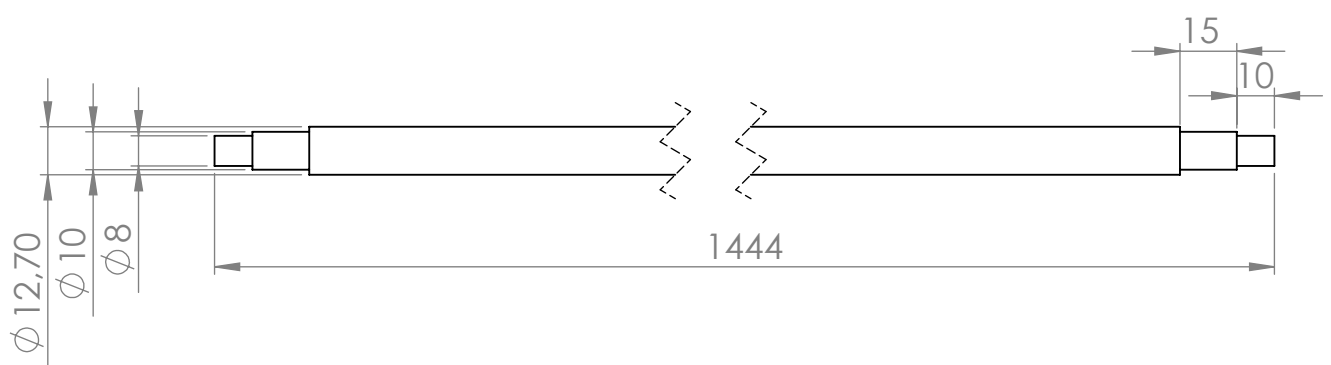
A5

Escala

1:2

No.
Plano

34/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Tornillo Potencia Eje Y

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Varilla Roscada
Perfil Cuadrado

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1



A5

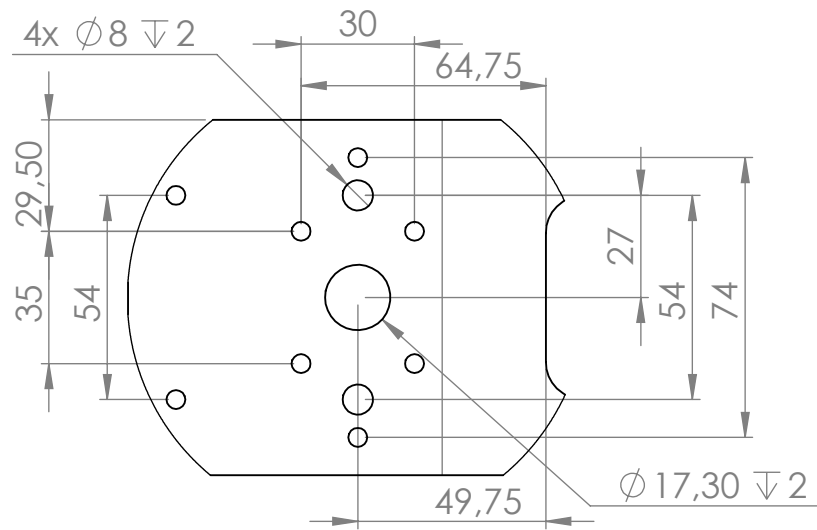
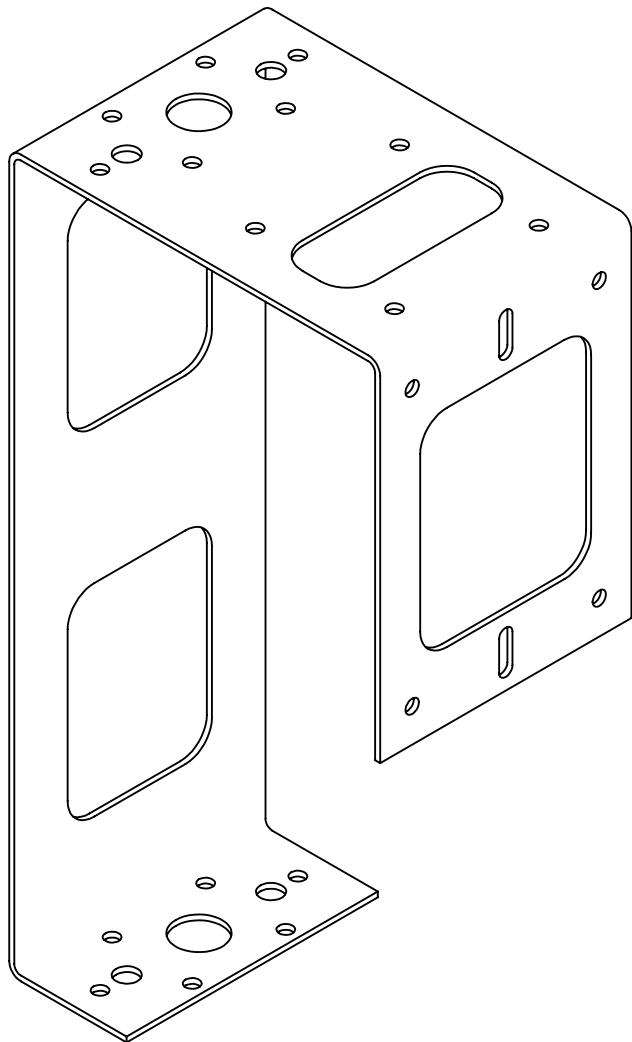
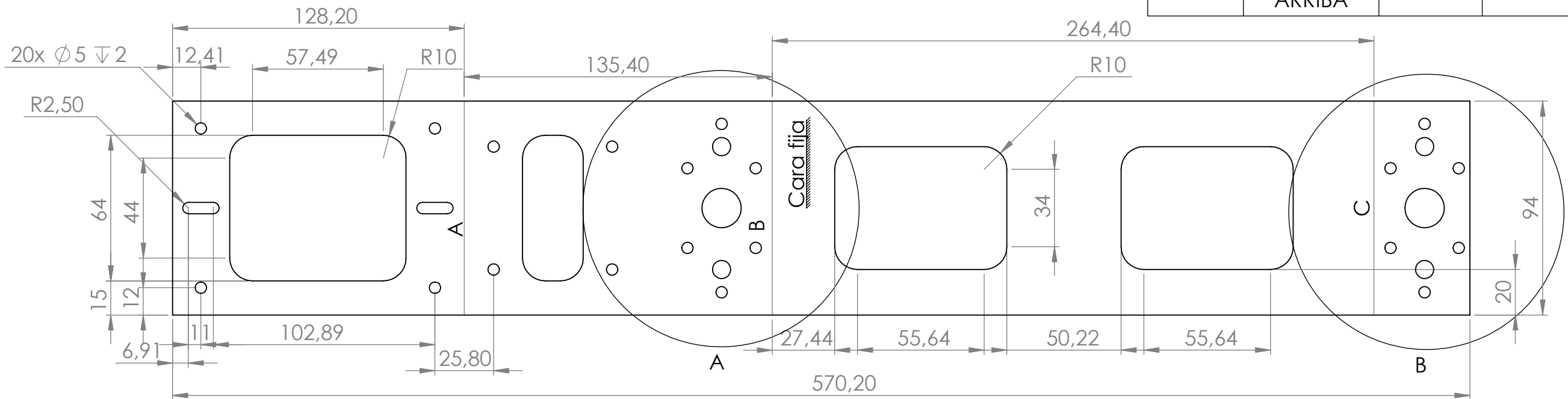
Escala

1:2

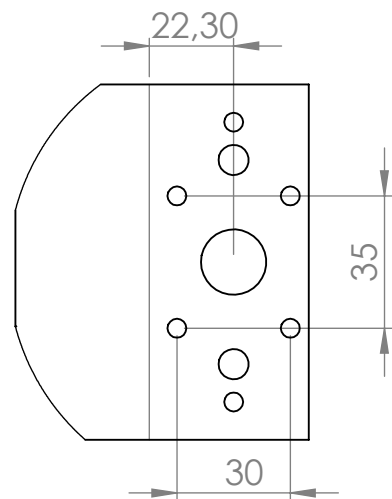
No.
Plano

35/48

Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ARRIBA	90°	2.54
B	HACIA ARRIBA	90°	2.54
C	HACIA ARRIBA	90°	2.54





DETALLE A
ESCALA 1 : 2

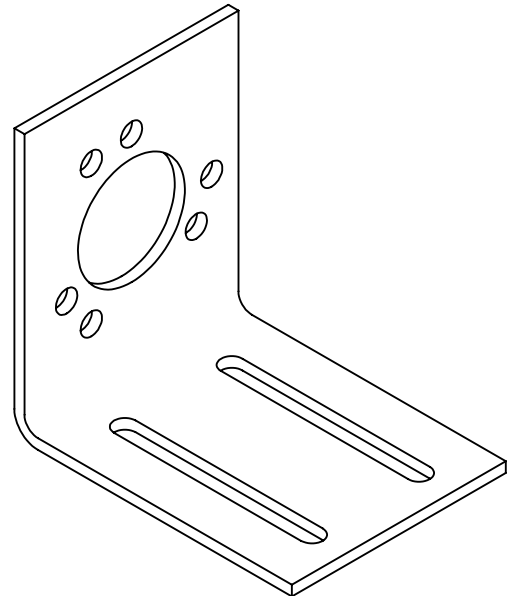
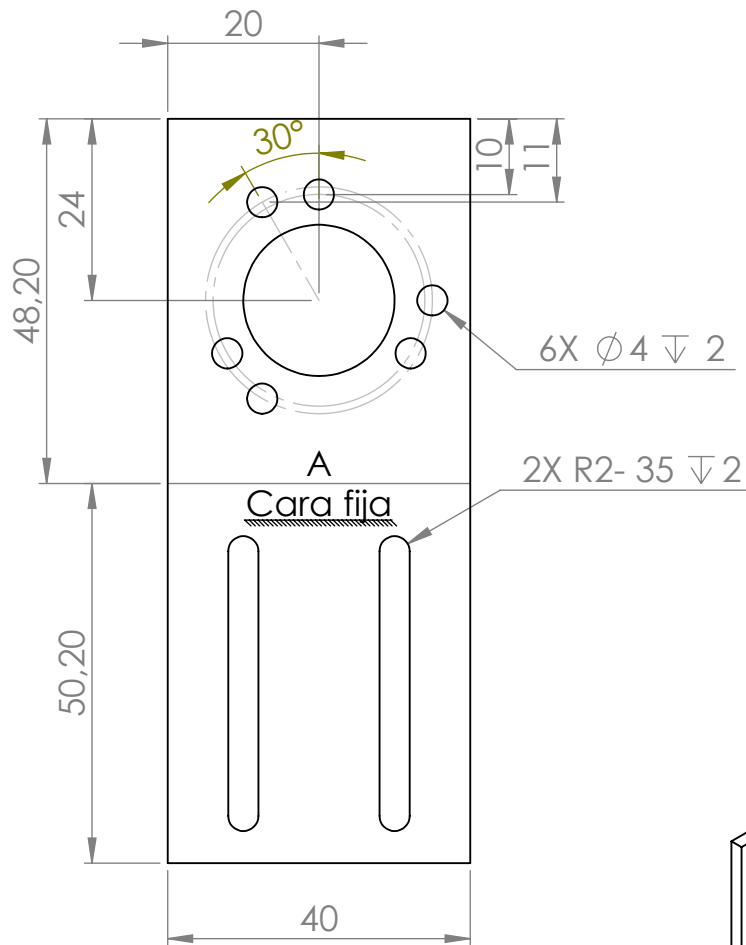


DETALLE B
ESCALA 1 : 2

ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica			Nombre Plano	Soporte Eje Z		
Material	Lamina cr calibre 14		Dibujó	Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017
Medidas en Milímetros	Tolerancia ± 0.1		Revisó	Ing. Aguirre	Fecha	10 Oct 2017
			A3	Escala	1:2	No. Plano 36/48

Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ARRIBA	90°	2.54



ROBOT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte Encoder

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 14

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1



A4

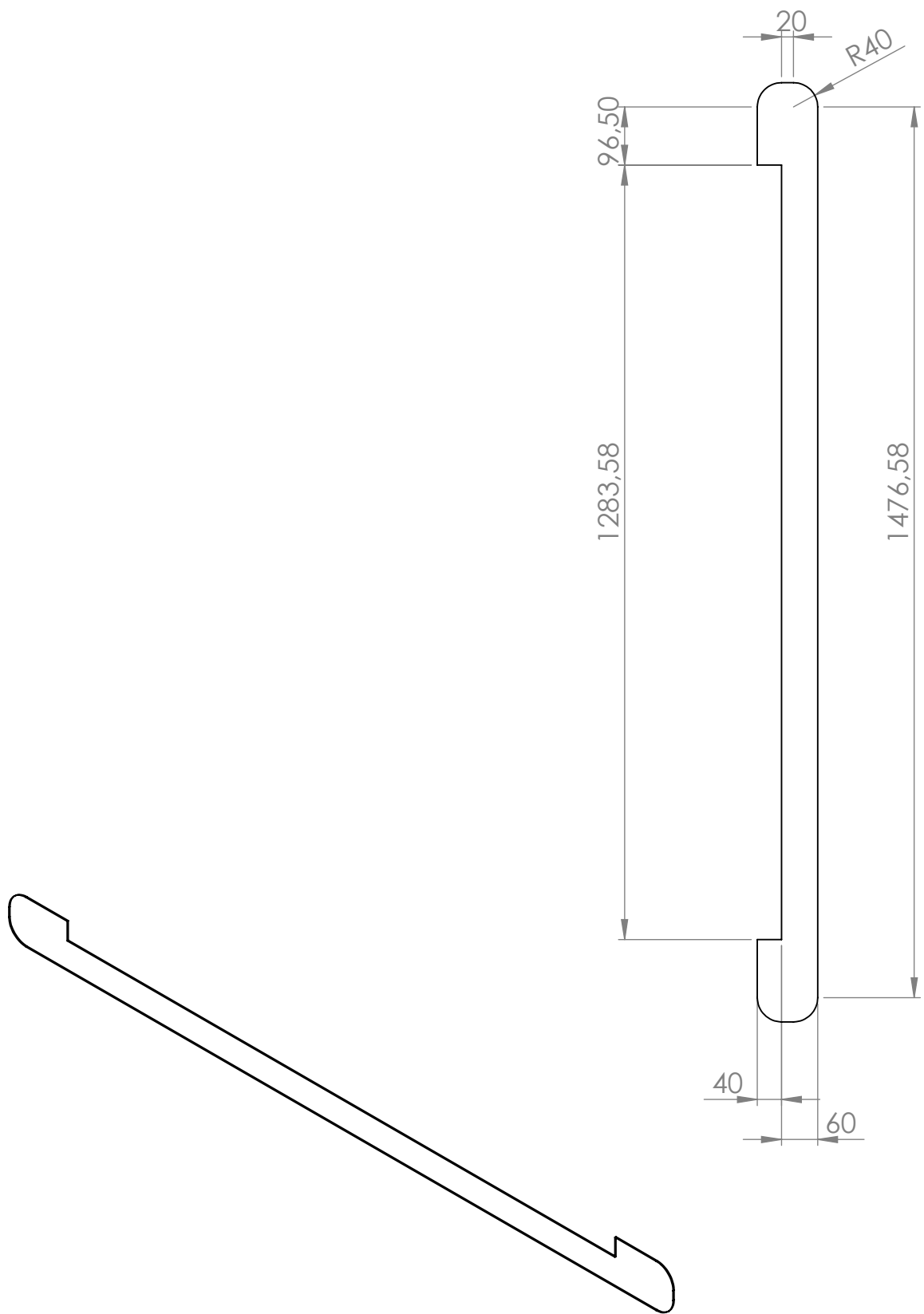
Escala

1:1

No.

Plano

37/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte frontal

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 16

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia $\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 0.1$

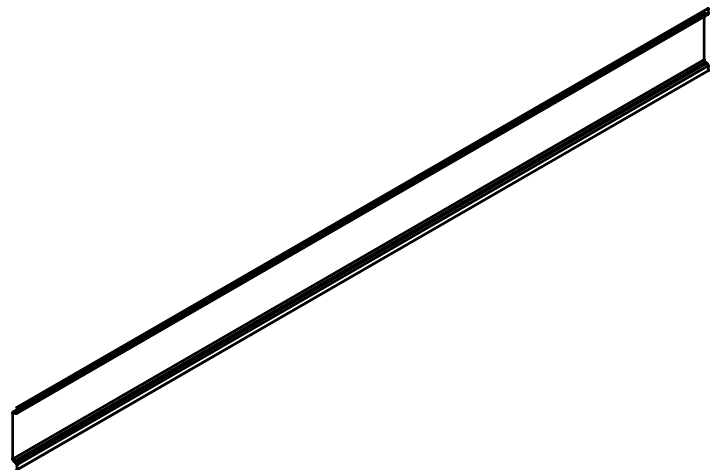
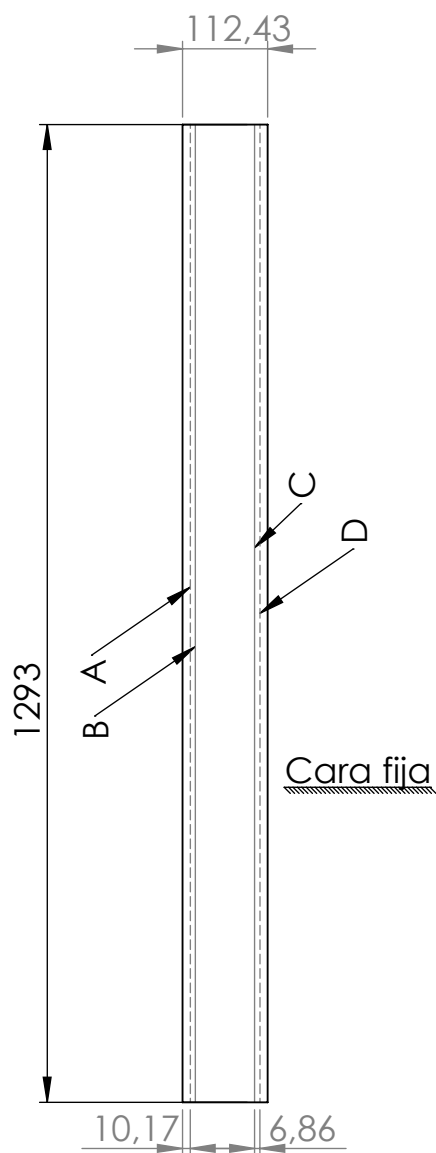


A3

Escala

1:10

No.
Plano 38/48



Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ABAJO	90°	1.91
B	HACIA ARRIBA	90°	1.91
C	HACIA ARRIBA	90°	1.91
D	HACIA ABAJO	90°	1.91

ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte lateral

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 16

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

+0.1

-0.1



A3

Escala

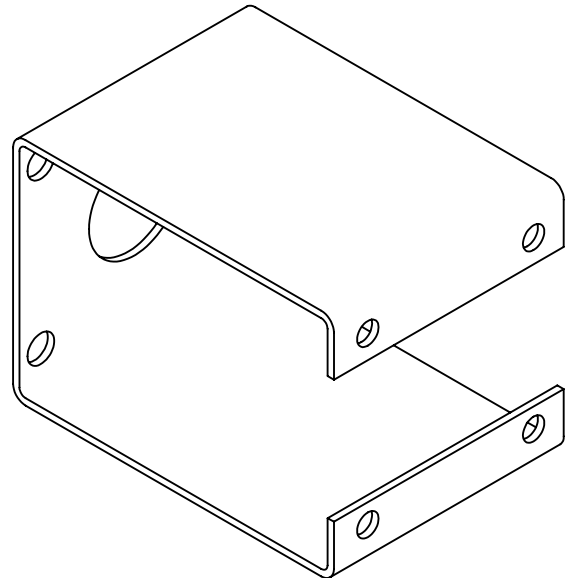
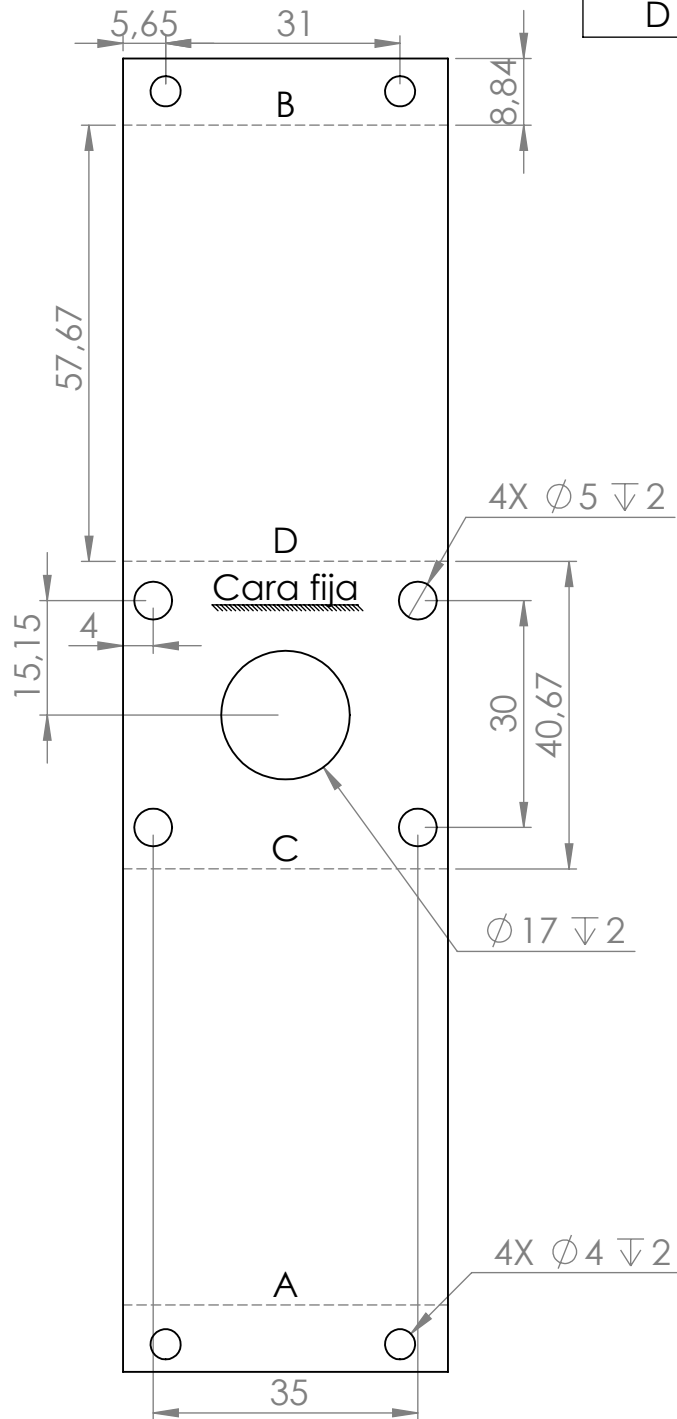
1:10

No.

Plano

39/48

Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ABAJO	90°	1.15
B	HACIA ABAJO	90°	1.15
C	HACIA ABAJO	90°	1.15
D	HACIA ABAJO	90°	1.15



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte Motor Nema 17 Eje Z

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 16

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en Milímetros

Tolerancia ± 0.1



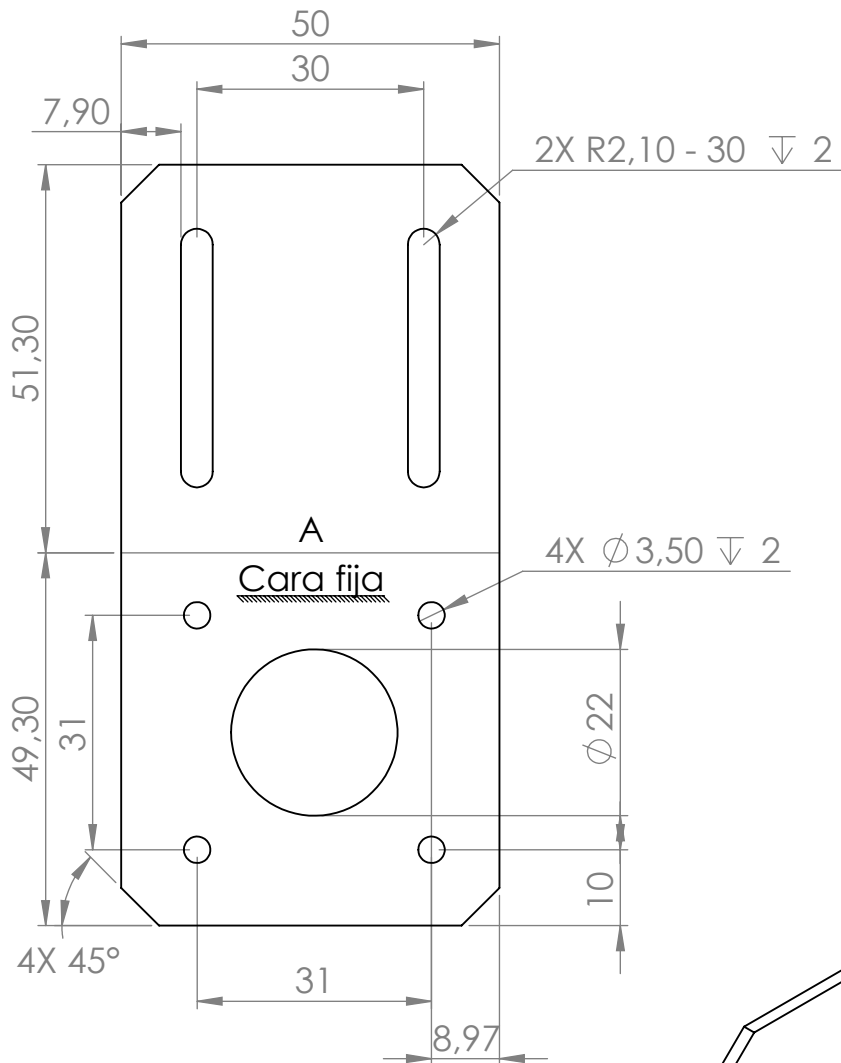
A4

Escala

1:1

No. Plano 40/48

Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ARRIBA	90°	2.54



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte Motor Nema 17

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 14

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

± 0.1



A4

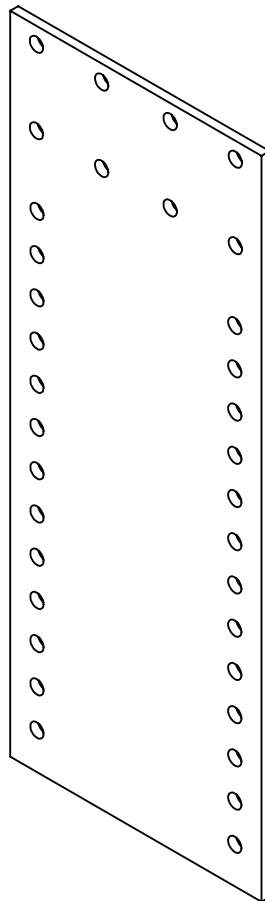
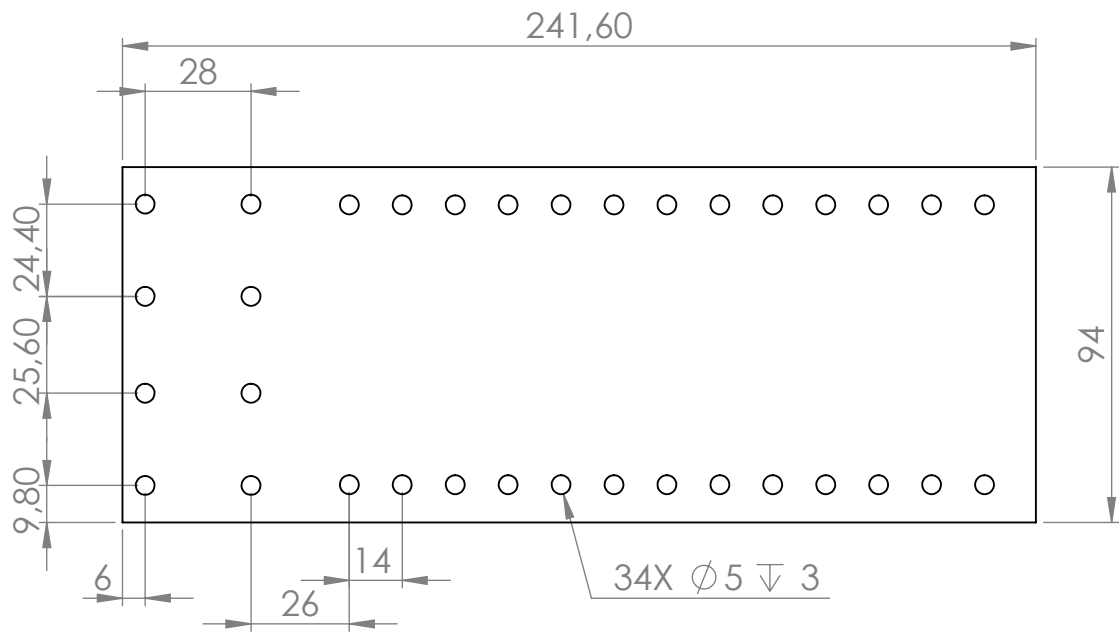
Escala

1:1

No.

Plano

41/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte Para Motor De Corte

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 12

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia

$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 0.1$

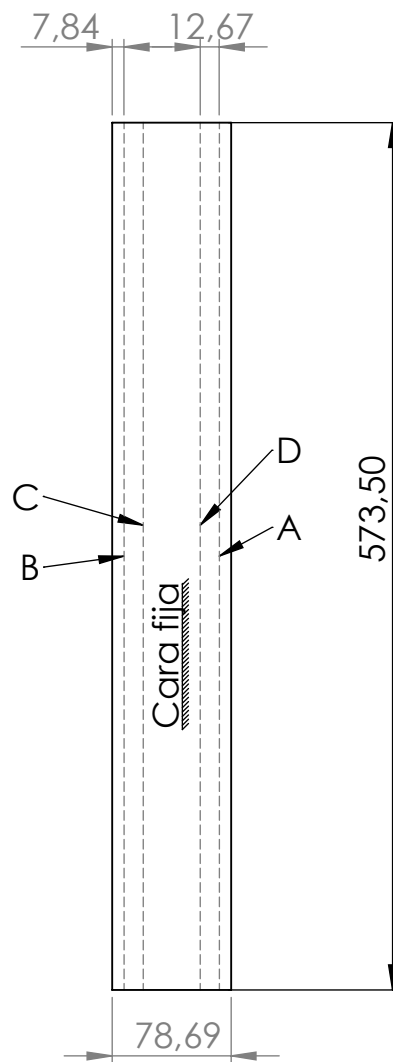


A4

Escala

1:2

No.
Plano 42/48



Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ABAJO	90°	1.15
B	HACIA ABAJO	90°	1.15
C	HACIA ABAJO	90°	1.15
D	HACIA ABAJO	90°	1.15

ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Soporte vertical

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina CR calibre 16

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en

Milímetros

Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$



A3

Escala

1:5

No.
Plano

43/48

Technical drawing of a rectangular plate with the following dimensions and specifications:

- Overall dimensions: 145,40 (height) x 22,10 (width).
- Section A-A: Indicated by a horizontal line across the top of the plate.
- Section B-B: Indicated by a horizontal line across the bottom of the plate.
- Hole specifications:
 - 4x $\varnothing 5 \nabla 2$ (4 holes, 2 on each side of the centerline).
 - 2x $\varnothing 8 \nabla 2$ (2 holes on the centerline).
 - 4x $\varnothing 5 \nabla 2$ (4 holes, 2 on each side of the centerline).
 - $\varnothing 17,30 \nabla 2$ (1 large central hole).
- Other dimensions:
 - 17,50 (distance from top edge to the first set of 4 holes).
 - 27 (distance from the first set of 4 holes to the centerline).
 - 10 (distance from the centerline to the second set of 4 holes).
 - 36,05 (distance from the second set of 4 holes to the bottom edge).
 - 55,55 (total distance from the first set of 4 holes to the bottom edge).
 - 21 (distance from the centerline to the right edge).
 - 32,20 (distance from the bottom edge to the centerline).
- Label: "Cara fija" (Fixed way) with a hatched line indicating a fixed support.



Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



U Soporte Eje Z

Cristian Rodriguez

10 Oct 2017

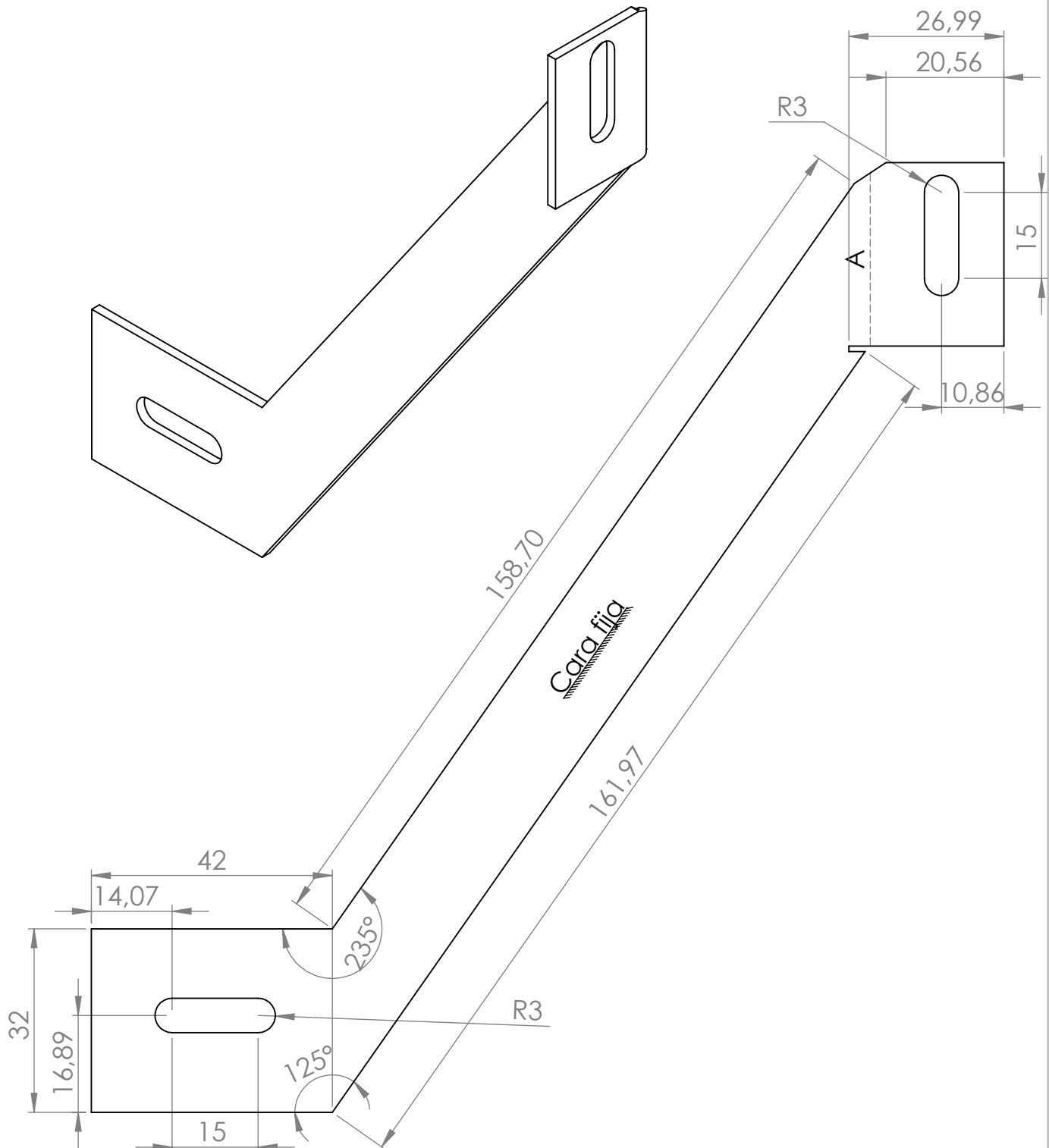
Lamina CR calibre 14

Ing. Aguirre

10 Oct 2017

No. 44/48
Plano

Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ABAJO	90°	2.54



ROBERT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Union U Soporte Eje Z Izquierdo

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina Cr calibre 14

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en Milímetros

Tolerancia ± 0.1



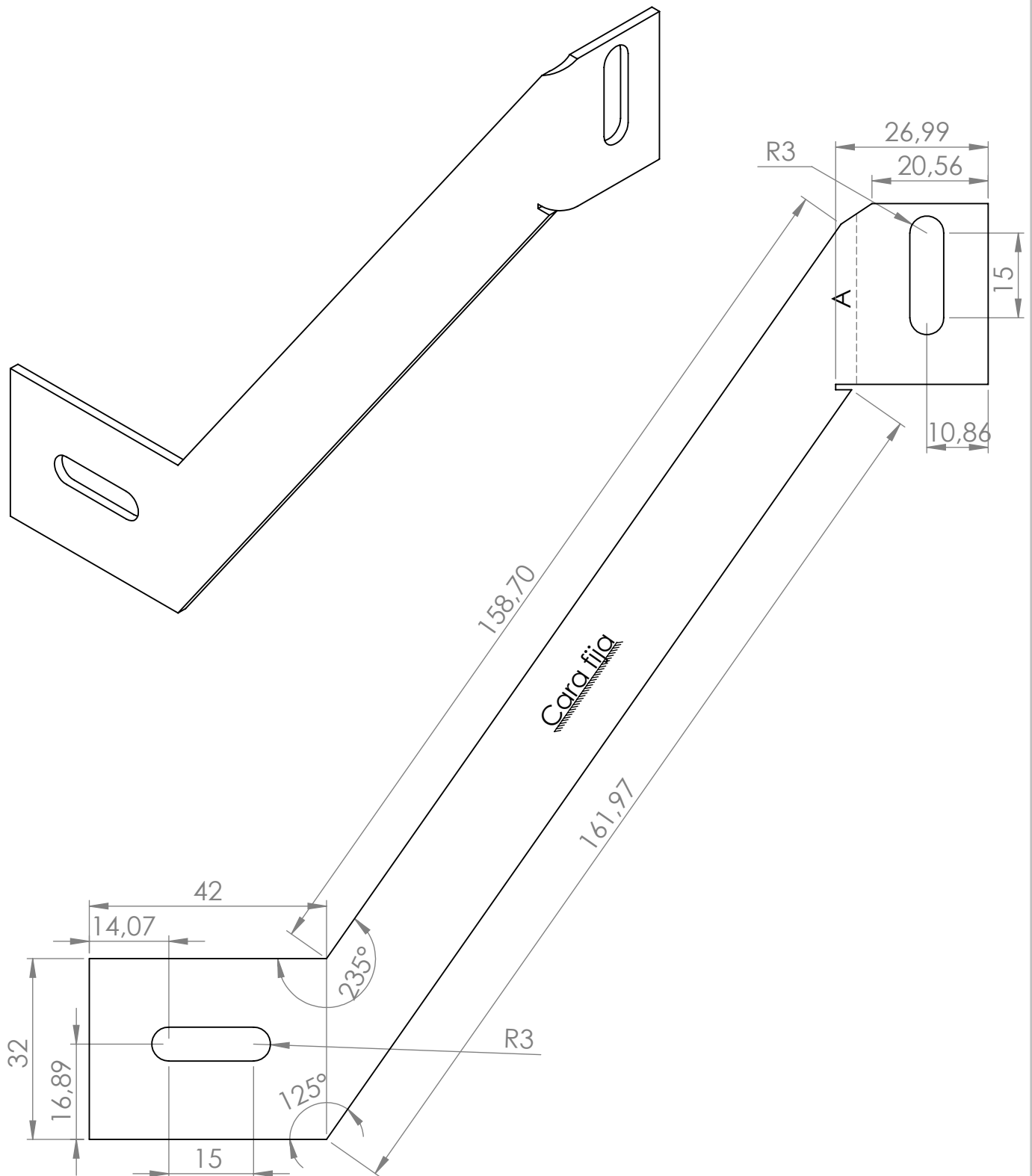
A4

Escala

1:1

No. Plano 45/48

Etiqueta	Dirección	Ángulo	Radio interior
A	HACIA ABAJO	90°	2.54



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica



Nombre
Plano

Union U Soporte Eje Z Derecho

Dibujó

Cristian Rodriguez

Fecha

10 Oct 2017

Material

Lamina Cr calibre 14

Revisó

Ing. Aguirre

Fecha

10 Oct 2017

Medidas en Milímetros Tolerancia $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$

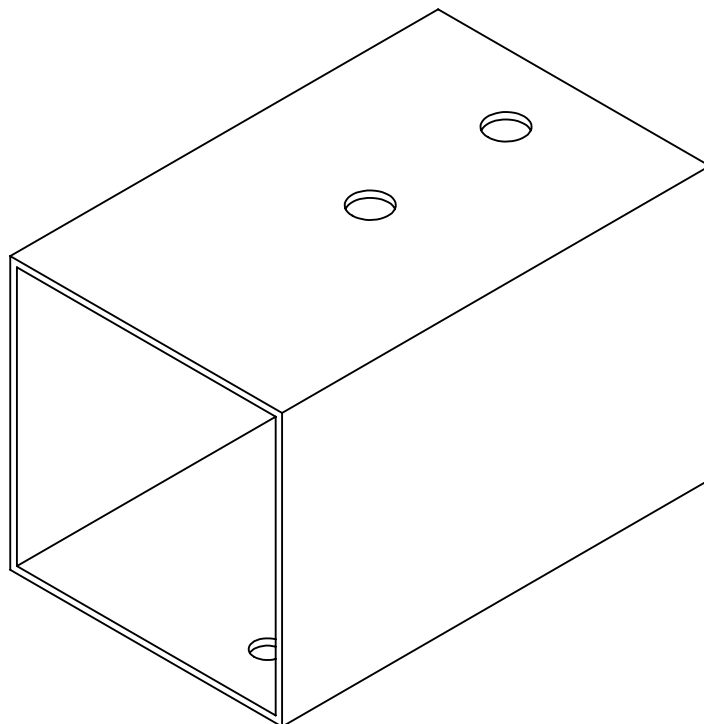
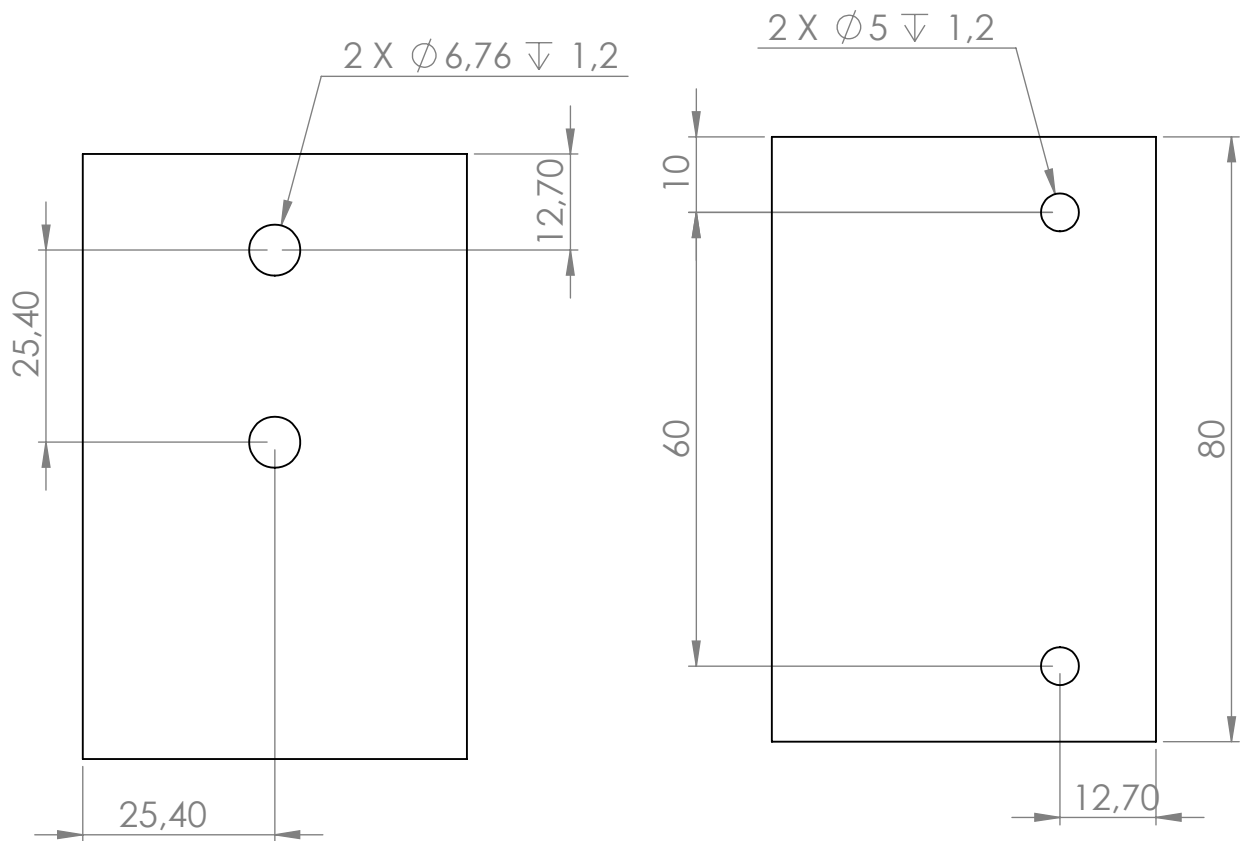


A4



Escala

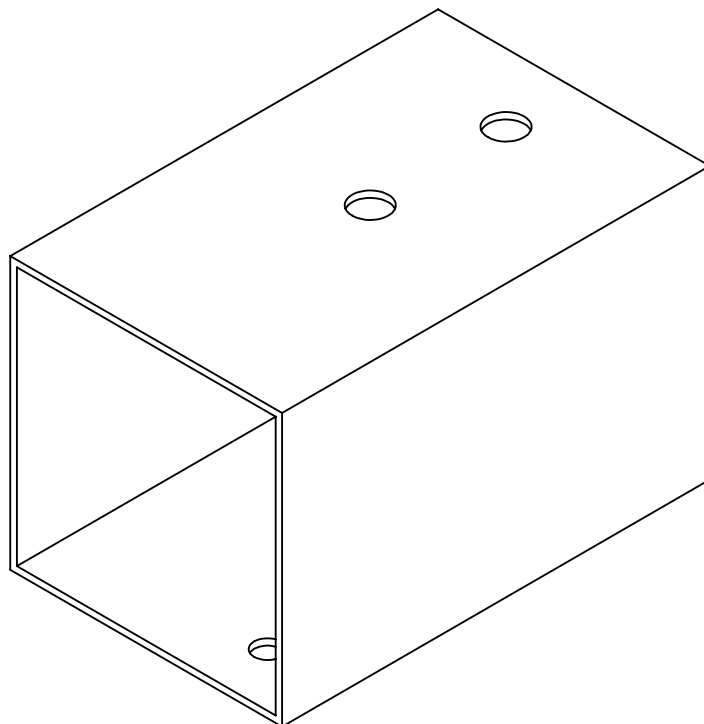
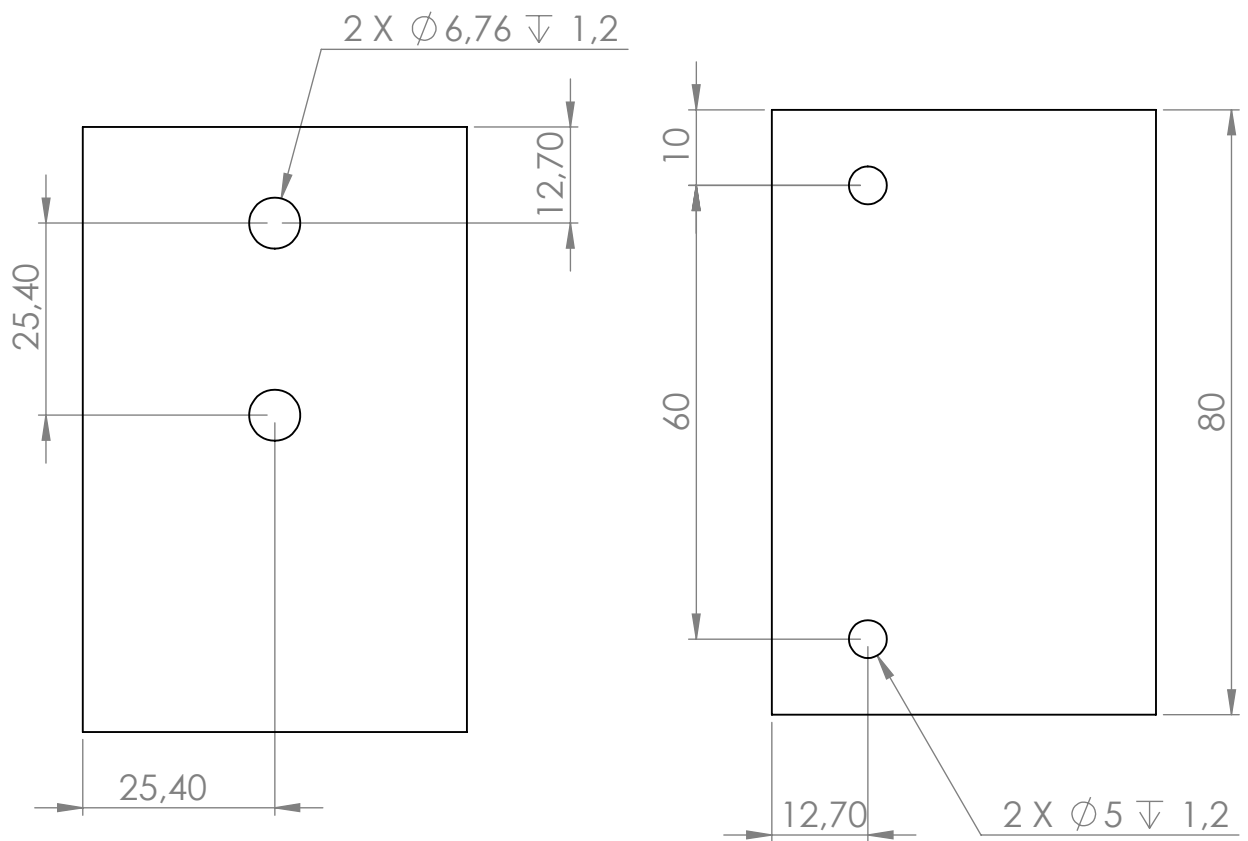
1:1

No.
Plano 46/48





ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica				Nombre Plano		Uniones Mesa Derecha		
				Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017
Material	Perfil Aluminio 6063 cuadrado 2"			Revisó		Ing. Aguirre	Fecha	10 Oct 2017
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	$\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$		A4	Escala	1:1	No. Plano 47/48



ROBORT CARTESIANO

Universidad Libre Facultad de Ingeniería Ingeniería Mecánica				Nombre Plano		Uniones Mesa Izquierda				
				Dibujó		Cristian Rodriguez	Fecha	10 Oct 2017		
Material		Perfil Aluminio 6063 cuadrado 2"		Revisó		Ing. Aguirre		Fecha	10 Oct 2017	
Medidas en	Milímetros	Tolerancia	+0.1 -0.1			A4	Escala	1:1	No. Plano	48/48